

Entwicklung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt unter Verwendung von Epoxydharz

Stefan Ludwig

**Heft 1
Essen 2009**



Schriftenreihe

Stefan Ludwig

**Entwicklung von langlebigen Deckschichten
aus Asphalt unter Verwendung
von Epoxydharz**

2009

Vorwort

Der Fahrbahnoberflächenzustand von Fahrbahnbefestigungen aus Asphalt verändert sich infolge von Verkehrs- und Klimabeanspruchungen. Insbesondere durch hohe Verkehrsbeanspruchungen in Kombination mit hohen Temperaturen können bleibende Verformungen in Form von Spurrinnen auftreten. Der Widerstand gegen bleibende Verformungen wird als Standfestigkeit bezeichnet. Die Standfestigkeit lässt sich durch die Zusammensetzung des Asphaltmischgutes steuern.

Neben den o.g. Beanspruchungen können besondere Beanspruchungen u.a. durch spurfahrenden langsamen Schwerverkehr, durch stehenden Schwerverkehr z.B. an Bushaltestellen oder stehender Schwerverkehr in Verbindung mit Brems- und Beschleunigungsvorgängen vor Lichtsignalanlagen hinzukommen. Auf diesen besonders beanspruchten Asphaltbefestigungen mit herkömmlicher Asphaltzusammensetzung sind Verformungen wie Längs- und Querunebenheiten nahezu unvermeidbar. Aus dieser Tatsache folgt als logischer Schritt die Entwicklung neuer Baustoffgemische unter Hinzufügung neuer Baustoffkomponenten in bewährte Baustoffgemische, um eine nachhaltige Standfestigkeit und Gebrauchsfähigkeit in Verbindung mit einer Steigerung der Qualität und Wirtschaftlichkeit zu erzielen. Eine Möglichkeit diesen Anforderungen gerecht zu werden, besteht in der Verwendung von Epoxydharz als Bindemittelzusatz im Asphaltgemisch, bezeichnet als „Epoxy Asphalt“.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde mit Hilfe umfangreicher Untersuchungen im Labormaßstab dargelegt, dass bei Verwendung eines solchen „Epoxy Asphaltes“ für Asphaltdeckschichten diese nachhaltig hochstandfest sind. Es wäre wünschenswert, wenn die Forschung auf diesem Gebiet, z.B. durch den Einsatz von „Epoxy Asphalt“ auf Erprobungsstrecken, weitergeführt werden könnten.

Die vorliegende Arbeit wurde in der Abteilung Bauwissenschaften der Fakultät Ingenieurwissenschaften der Universität Duisburg-Essen als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades „Doktor-Ingenieur“ anerkannt.

Prof. Dr.-Ing. Edeltraud Straube

Entwicklung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt unter Verwendung von Epoxydharz

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität
Duisburg-Essen zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Stefan Ludwig

aus Leverkusen

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Edeltraud Straube

Koreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg

Tag der Einreichung: 17.11.2008

Tag der mündlichen Prüfung: 06.04.2009

Essen 2009

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Referat „Asphaltbauweisen“ der Abteilung Straßenbautechnik bei der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt).

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Kollegen des Referates Asphaltbauweisen für die gute Zusammenarbeit sowie die wertvollen Hinweise bei der Erstellung dieser Arbeit bedanken. Besonderer Dank gilt hierbei den Mitarbeitern des Asphaltlaboratoriums, ohne deren tatkräftige Unterstützung, unermüdlichen Einsatz und persönlichem Engagement die Umsetzung und Durchführung der Untersuchungen nicht möglich gewesen wäre.

Ein besonderes Dankeschön gilt Frau Professor Dr.-Ing. Edeltraud Straube für die Förderung dieser Arbeit, die stetige fachliche Begleitung, die hilfreichen Anregungen und Hinweise sowie für die Übernahme des Referates.

Herrn Professor Dr.-Ing. Martin Radenberg möchte ich für die Übernahme des Koreferates danken. Seine fachlichen Ratschläge und Kommentare waren sehr hilfreich bei der Erstellung dieser Dissertation.

Besonderer Dank gebührt der Bundesanstalt für Straßenwesen, die mir die Durchführung der erforderlichen Untersuchungen ermöglicht und damit die Voraussetzung für die Erstellung dieser Arbeit geschaffen hat.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dr. Volker Hirsch und den Mitarbeitern des Referates „Chemische Grundlagen“ für die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung und Beurteilung der Bindemitteluntersuchungen sowie aller weiteren chemischen Analysen. Ohne seine vielen fachlichen Ratschläge und Interpretationen wäre so manche Fragestellung unbeantwortet geblieben.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Frau Nina bedanken, die mir in schwierigen Situationen stets mit Rat und Tat zur Seite stand und in kritischen Momenten immer eine moralische Stütze war.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Ziel der Untersuchungen.....	2
2	Stand der Wissenschaft und Technik.....	4
2.1	Eigenschaften und Anwendungsgebiete von Epoxydharzen	4
2.1.1	Historische Entwicklung	4
2.1.2	Anwendungsbereiche	5
2.1.3	Zusammensetzung, Härtung und Verarbeitung	6
2.2	Bisherige Verwendung im Straßenbau	9
2.2.1	Halbstarre Deckschichten	9
2.2.2	Oberflächenbehandlungen auf Reaktionsharzbasis.....	11
2.2.3	Epoxy Asphalt als Fahrbahnbelag auf Stahlbrücken.....	13
3	Untersuchungsmethodik	16
3.1	Vorgehensweise	16
3.2	Baustoffe.....	18
3.2.1	Gesteinskörnungen	18
3.2.2	Bindemittel.....	18
3.3	Eignungsprüfungen.....	21
3.4	Mischgut- und Probekörperherstellung	24
3.5	Prüfverfahren	26

I. Grundlagenuntersuchungen mit unterschiedlichen Epoxydharzsystemen

4	Untersuchungen mit einem Epoxydharzsystem mit Polyaminhärter	28
4.1	Handmischungen	28
4.2	Mischgutherstellung im Labormischer	29
5	Untersuchungen mit einem Epoxydharzsystem mit Anhydridhärter ohne Verwendung eines Beschleunigers	31

5.1	Handmischungen	31
5.2	Mischgutherstellung im Labormischer	31
6	Untersuchungen mit einem Epoxydharzsystem mit Anhydridhärter bei Verwendung eines Beschleunigers	36
6.1	Handmischungen	36
6.2	Mischgutherstellung im Labormischer	37
7	Vergleichende Betrachtung der unterschiedlichen Epoxydharzsysteme	40

II. Hauptuntersuchungen mit einem ausgewählten Epoxydharzsystem

8	Hauptuntersuchungen an ausgewählten Varianten	45
8.1	Bindemitteluntersuchungen	45
8.1.1	Erweichungspunkt Ring und Kugel	45
8.1.2	Dynamisches Scherrheometer	46
8.1.3	Kraftduktilometer	49
8.1.4	Bending Beam Rheometer	50
8.2	Mischgutuntersuchungen	51
8.2.1	Verformungsbeständigkeit im Spurbildungsversuch	51
8.2.2	Verformungsbeständigkeit im Druckschwellversuch	53
8.2.3	Haftverhalten am Einzelkorn	56
8.2.4	Haftverhalten im Mischgut.....	57
8.2.5	Schichtenverbund.....	60
8.2.6	Tieftemperaturverhalten	62
8.2.7	Ermüdungsbeständigkeit.....	65
9	Bewertung der Ergebnisse.....	70

III. Weiterführende Untersuchungen

10	Spezielle Fragestellungen	78
10.1	Reaktion des Epoxydharzes im Bitumen	78
10.2	Extraktion von Epoxy Asphalt	81

10.3	Bewitterungsversuche.....	87
10.4	Griffigkeitsentwicklung unter Verkehr	93
10.5	Widerstand gegen Dauerbelastung bei tiefen Temperaturen	100
10.6	Arbeits- und Umweltschutz	107
10.7	Voraussetzungen für Feldversuche	107

IV. Theoretische Beschreibung des Verformungsverhaltens

11	Modelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalt	111
11.1	Elemente rheologischer Modelle.....	111
11.1.1	Linear-elastische Verformung – lineare Feder	111
11.1.2	Linear-viskose Verformung – linearer Dämpfer.....	112
11.1.3	Nichtlinear-viskose Verformung – parabolischer Dämpfer	113
11.1.4	Plastische Verformung – St.-Venant-Element.....	113
11.2	Linear rheologische Modelle	114
11.2.1	Maxwell Modell.....	114
11.2.2	Kelvin-Voigt Modell.....	115
11.2.3	Burgers Modell	117
11.3	Bestehende rheologische Modelle von Asphalt	119
11.3.1	Monismith Modell	119
11.3.2	Krass Modell.....	120
11.3.3	Huschek Modell.....	121
11.3.4	Power-Law Modell.....	123
11.3.5	Huet Modell	124
11.3.6	Huet-Sayegh Modell.....	125
11.3.7	2S2P1D Modell	126
12	Übertragung der Modelle auf das Verformungsverhalten von Epoxy Asphalt.....	128

V. Zusammenfassung

13	Zusammenfassung	132
14	Literaturverzeichnis	136

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Leiterplatine aus Epoxydharz [3]	6
Abbildung 2: Molekül eines Epoxydharzes [3].....	7
Abbildung 3: Polyaddition von Bisphenol A und Epichlorhydrin [4]	7
Abbildung 4: Halbstarre Deckschichten gemäß [5]	9
Abbildung 5: Halbstarre Deckschicht im Bereich einer Bushaltestelle	10
Abbildung 6: Auftragen des Bindemittels für Oberflächenbehandlungen auf Reaktionsharzbasis	12
Abbildung 7: Abstreuen des Bindemittels mit Gesteinskörnung.....	12
Abbildung 8: Schichtenaufbau eines Brückenbelages aus Epoxy Asphalt [32]	13
Abbildung 9: Brücke über den Yangtze bei Nanjing [7]	14
Abbildung 10: Einbau von Epoxy Asphalt auf der Brücke von Runyang [8]	15
Abbildung 11: Korngrößenverteilung SMA 0/11 S.....	22
Abbildung 12: Korngrößenverteilung Asphaltbinder 0/22 S	23
Abbildung 13: Labormischer.....	24
Abbildung 14: Vermischen von Bitumen und Epoxydharz	25
Abbildung 15: Walzsektor-Verdichtungsgerät	26
Abbildung 16: Ergebnis eines Druckschwellversuches an einem ersten Epoxy-Probekörper (polyamin).....	28
Abbildung 17: Raumdichten von drei nacheinander verdichteten MPK aus Epoxy Asphalt (polyamin).....	29
Abbildung 18: Hohlraumgehalt von drei nacheinander verdichteten MPK aus Epoxy Asphalt (polyamin).....	30
Abbildung 19: Spurrinnentiefe in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probekörperherstellung ..	32
Abbildung 20: Spurrinnentiefe bei 25% Epoxy ohne Beschleuniger in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probekörperherstellung	33
Abbildung 21: Spurrinnentiefe bei 15% Epoxy ohne Beschleuniger in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probekörperherstellung	34
Abbildung 22: Spurrinnentiefe bei 5% Epoxy ohne Beschleuniger in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probekörperherstellung	34
Abbildung 23: Spurrinnentiefe nach 20.000 Überrollungen in Abhängigkeit vom Verdichtungszeitpunkt ohne Beschleuniger	35
Abbildung 24: Spurrinnentiefe bei 25% Epoxy mit Beschleuniger in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probekörperherstellung	37

Abbildung 25: Spurrinnentiefe bei 15% Epoxy mit Beschleuniger in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probekörperherstellung	38
Abbildung 26: Spurrinnentiefe bei 5% Epoxy mit Beschleuniger in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probekörperherstellung	38
Abbildung 27: Spurrinnentiefe nach 20.000 Überrollungen in Abhängigkeit vom Verdichtungszeitpunkt mit Beschleuniger	39
Abbildung 28: Vergleich der Spurrinnentiefe der untersuchten Varianten nach 20.000 Überrollungen	42
Abbildung 29: Vergleich der Spaltzugfestigkeiten der untersuchten Varianten	42
Abbildung 30: Erweichungspunkte Ring und Kugel	46
Abbildung 31: Komplexer Schubmodul der geprüften Bindemittel	47
Abbildung 32: Phasenwinkel der geprüften Bindemittel	47
Abbildung 33: Kraftduktilität der geprüften Bindemittel	49
Abbildung 34: Ergebnis der Bindemittelprüfung im Bending Beam Rheometer	51
Abbildung 35: Ergebnisse der Spurbildungsversuche der geprüften Varianten	52
Abbildung 36: Ergebnisse der Druckschwellversuche der geprüften Varianten	53
Abbildung 37: Probekörper der vier Varianten nach Beendigung der Druckschwellversuche	55
Abbildung 38: Grafische Darstellung der Umhüllungsgrade	56
Abbildung 39: Spaltzugversuche bei Referenz 50/70	59
Abbildung 40: Spaltzugversuche bei Referenz PmB	59
Abbildung 41: Spaltzugversuche bei 15% Epoxy	59
Abbildung 42: Spaltzugversuche bei 25% Epoxy	59
Abbildung 43: Plattenpaket und daraus entnommene Bohrkern	60
Abbildung 44: grafische Darstellung des Tieftemperaturverhaltens der Variante Referenz PmB	63
Abbildung 45: grafische Darstellung des Tieftemperaturverhaltens der Variante 25% Epoxy	64
Abbildung 46: Ergebnisse der Dreipunkt-Biegeversuche der geprüften Varianten	66
Abbildung 47: statisches System eines Einfeldträgers bei zentrischer Belastung	67
Abbildung 48: Kleinere Risse neben der Bruchstelle bei der Variante Referenz PmB	68
Abbildung 49: Unterseite eines Prismas der Variante 15% Epoxy nach der Prüfung	69
Abbildung 50: Veränderung maßgebender Asphalteigenschaften durch Epoxydharz bezogen auf die Eigenschaften der Variante Referenz 50/70 in [%]	74
Abbildung 51: Prozentuale Veränderung von zwei Asphalteigenschaften durch Epoxydharz bezogen auf die Eigenschaften der Variante Referenz 50/70	75

Abbildung 52: Granulierung eines Probekörpers aus Epoxy Asphalt.....	82
Abbildung 53: Gesteinskörnungsgemisch aus extrahiertem Epoxy Asphalt	83
Abbildung 54: Füller aus extrahiertem Epoxy Asphalt.....	83
Abbildung 55: IR-Spektren von Epoxydharzen aus Bindemittelgemischen vor und nach Extraktion	85
Abbildung 56: Thermogravimetrische Untersuchung von Gesteinen vor und nach Extraktion	86
Abbildung 57: Bewitterung von Probekörpern aus Epoxy Asphalt	88
Abbildung 58: SRT-Messungen während der Bewitterungsdauer	88
Abbildung 59: Platten der Variante Referenz 50/70 vor (links) und nach (rechts) der Bewitterung	90
Abbildung 60: Platten der Variante 25% Epoxy vor (links) und nach (rechts) der Bewitterung	90
Abbildung 61: Dreipunkt-Biegeversuche an Probekörpern nach einer Bewitterung	91
Abbildung 62: Vergleich von bewitterten und nicht bewitterten Probekörpern bei Referenz 50/70.....	91
Abbildung 63: Vergleich von bewitterten und nicht bewitterten Probekörpern bei 15% Epoxy	92
Abbildung 64: Vergleich von bewitterten und nicht bewitterten Probekörpern bei 25% Epoxy	92
Abbildung 65: Prinzipskizze der Rundlaufprüfanlage der BAST	94
Abbildung 66: Rundlaufprüfanlage der BAST (Fotomontage)	94
Abbildung 67: WSV-Platte mit beschnittenen Längsseiten und eingesetzten Schrauben	96
Abbildung 68: fertiger Probekörper für die Prüfung in der RPA	96
Abbildung 69: Probekörper in der RPA	97
Abbildung 70: SRT-Einheiten in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen.....	98
Abbildung 71: Oberflächen der Platten der Variante Referenz PmB nach 4 Mio. Überrollungen.....	99
Abbildung 72: Oberflächen der Epoxy-Platten nach 4 Mio. Überrollungen	99
Abbildung 73: Probekörperform für eine Dauerbelastung bei tiefen Temperaturen	101
Abbildung 74: Probekörper für die Versuche zur Dauerbelastung bei tiefen Temperaturen.....	102
Abbildung 75: Prüfvorrichtung für die Versuche zur Dauerbelastung bei tiefen Temperaturen.....	103
Abbildung 76: Ergebnisse der dynamischen Dauerbelastung bei +5°C.....	104
Abbildung 77: Ergebnisse der dynamischen Dauerbelastung bei -5°C.....	105

Abbildung 78: Ergebnisse der dynamischen Dauerbelastung bei -15°C.....	105
Abbildung 79: Bruchlastwechselzahlen bei der dynamischen Dauerbelastung	106
Abbildung 80: Symbol und Verformungsverhalten einer linearen Feder.....	112
Abbildung 81: Symbol und Verformungsverhalten eines linearen Dämpfers	112
Abbildung 82: Symbol und Verformungsverhalten eines parabolischen Dämpfers	113
Abbildung 83: Symbol und Verformungsverhalten eines St.-Venant-Elementes	113
Abbildung 84: Modell von Maxwell	115
Abbildung 85: Verformungsverhalten des Maxwell Modells.....	115
Abbildung 86: Modell von Kelvin-Voigt.....	116
Abbildung 87: Verformungsverhalten des Kelvin-Voigt Modelles.....	117
Abbildung 88: Burgers Modell	118
Abbildung 89: Verformungsverhalten des Burgers Modelles	118
Abbildung 90: Monismith Modell	119
Abbildung 91: Krass Modell.....	120
Abbildung 92: Verformungsverhalten des Krass Modelles.....	121
Abbildung 93: Huschek Modell.....	122
Abbildung 94: Verformungsverhalten des Huschek Modelles	122
Abbildung 95: Power-Law Modell.....	123
Abbildung 96: Verformungsverhalten des Power-Law Modelles	124
Abbildung 97: Huet Modell	125
Abbildung 98: Verformungsverhalten des Huet Modelles	125
Abbildung 99: Huet-Sayegh Modell.....	126
Abbildung 100: 2S2P1D Modell	127
Abbildung 101: Modell für Epoxy Asphalt.....	129
Abbildung 102: Verformungsverhalten von Epoxy Asphalt	129

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Rohdichten der verwendeten Gesteinskörnungen	18
Tabelle 2: Kennwerte der verwendeten Bindemittel.....	19
Tabelle 3: Kennwerte der verwendeten Epoxydharze.....	20
Tabelle 4: Kennwerte der verwendeten Härter.....	20
Tabelle 5: Kennwerte des verwendeten Beschleunigers	20

Tabelle 6: Eignungsprüfung für SMA 0/11 S	21
Tabelle 7: Eignungsprüfung Asphaltbinder 0/22 S	22
Tabelle 8: Erweichungspunkte Ring und Kugel in °C.....	46
Tabelle 9: Wendepunkte der Verformungskurven.....	53
Tabelle 10: Umhüllungsgrade nach der Affinitätsprüfung	56
Tabelle 11: Ergebnisse der Spaltzugprüfungen	58
Tabelle 12: Ergebnisse der Scherversuche nach Leutner	61
Tabelle 13: Ergebnisse der Kälteversuche bei der Variante Referenz PmB.....	63
Tabelle 14: Ergebnisse der Kälteversuche bei der Variante 25% Epoxy	64
Tabelle 15: Anzahl der Lastzyklen bis zum Bruch beim Dreipunkt-Biegeversuch	67
Tabelle 16: Prozentuale Veränderung maßgebender Asphalteigenschaften durch Epoxydharz bezogen auf die Eigenschaften der Variante Referenz 50/70	73
Tabelle 17: Erweichungspunkte Ring und Kugel von Bindemittel-Füller-Gemischen in °C.....	79
Tabelle 18: Erweichungspunkte Ring und Kugel von Bindemittelgemischen mit Phosphorsäure in °C	80
Tabelle 19: SRT-Einheiten der Probekörper während der Prüfung in der RPA	97

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Das deutsche Straßennetz besteht aus mehr als 600.000 km befestigten Straßen, von denen mehr als 90% in Asphaltbauweise ausgeführt wurden. Dieses Asphaltstraßennetz von Bund, Länder und Kommunen bildet u. a. die Grundlage für die Wirtschaftskraft des Standortes Bundesrepublik Deutschland.

Daher werden die Anforderungen an eine solche Asphaltstraße abhängig vom Betrachter aus verschiedenen Blickwinkeln formuliert: Der Straßennutzer hat den Wunsch nach ebenen, griffigen, hellen und lärm mindernden Oberflächen. Der Straßenbaulastträger hat dagegen weitergehende, technisch begründete Forderungen. Er erwartet dauerhafte, standfeste, rissfreie, verschleißresistente und nicht zuletzt erhaltungsarme Straßen.

Auf Grund dessen besteht das Bestreben, neben den bereits in der Praxis etablierten und bewährten Baustoffen mit Innovationen neue Baustoffgemische zu entwickeln, die hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Eigenschaften und Anforderungen wie nachhaltige Verformungsbeständigkeit und Gebrauchstauglichkeit eine zusätzliche Steigerung der Qualität und Wirtschaftlichkeit erzielen sollen.

Doch trotz aller Innovationen und Entwicklungen, die in der Vergangenheit sowohl im Bereich der einzelnen Baustoffkomponenten als auch am resultierenden Asphaltmischgut durch intensive Forschung und Erprobung erzielt und realisiert werden konnten, basieren die Kenntnisse über den Werkstoff Asphalt oftmals immer noch auf Erfahrungen. Das Verhalten des „Systems“ Asphalt stellt sich als sehr komplex dar, da die Eigenschaften der einzelnen Bestandteile voneinander abhängen bzw. sich gegenseitig beeinflussen und es zusätzlich in hohem Maße abhängig von den gegebenen Randbedingungen wie z. B. Temperatur, Frequenz, etc. ist.

Bei ungünstigen Randbedingungen wie spurfahrendem, langsam fahrendem Schwerverkehr, durch Standverkehr (z. B. Bushaltestellen), Stauräumen sowie signalgeregelten Knotenpunkten ist das Auftreten von Verformungen in Form von Quer- und Längsunebenheiten nahezu unvermeidbar.

Die Spurrinnenbildung bei spurfahrendem Schwerverkehr ist umso größer, je höher die Achslast und die Temperatur und je geringer die Frequenz und die Verformungsbeständigkeit der Asphaltsschichten ist.

Vor Lichtsignalanlagen und an Bushaltestellen kommt es darüber hinaus zu Schubbeanspruchungen aus Brems- und Beschleunigungskräften, die in den Asphaltdeckschichten zu horizontalen Verschiebungen führen können (Zustandsmerkmal Ebenheit im Längsprofil). Zudem kommt es hier zu vertikal auftretenden niederfrequenten dynamischen Belastungen (Druckschwellbelastungen) durch an- und abfahrenden Verkehr.

Nicht vernachlässigt werden darf auch das Verhalten des Asphaltes bei tiefen Temperaturen. Im Falle der Überlagerung von temperaturbedingten (kryogenen) Spannungen mit verkehrslastbedingten Spannungen kommt es häufig zu einer Rissbildung im Asphalt, die Ansätze für ein Fortschreiten der Schädigung bieten. Verformungsbeständige Beläge sind daher häufig rissgefährdet, und umgekehrt neigen Beläge mit hoher Rissicherheit zu großer Verformung.

1.2 Ziel der Untersuchungen

Die Verformungsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit von Deckschichten aus Asphalt kann auf verschiedene Art und Weise erreicht werden: In Abhängigkeit von ihrer Mischgutart (Asphaltbeton, Gussasphalt, Splittmastixasphalt), somit deren Kornzusammensetzung und Bindemittelgehalt sowie der Art des Bitumens und möglicher Zusätze, kann Einfluss auf das Verhalten gegen die auftretenden Beanspruchungen genommen werden.

Vor diesem Hintergrund wurde von der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD, en.: Organisation for Economic Cooperation and Development) eine Studie [1] durchgeführt, um festzustellen ob bei hochbelasteten Straßen mit innovativen Baustoffen, die zwar u. U. höhere Herstellungskosten erfordern, während der Nutzungsdauer jedoch erhebliche Erhaltungskosten vermeiden würden, langlebige Straßenbeläge wirtschaftlich gerechtfertigt sind.

Diese Studie kommt zu dem Schluss, dass die Entwicklung innovativer Deckschichten einen beträchtlichen wirtschaftlichen Vorteil bedeuten könnte. Bei einer erwarteten Lebensdauer von 30 Jahren könnten Deckschichtbeläge für hochbelastete Straßen, auch wenn sie etwa das dreifache von traditionellen Belägen kosten, ökonomisch sinnvoll sein.

Eine Orientierung an den zur Zeit auf dem Markt vorhandenen und gebräuchlichen Baustoffen und Produkten zeigt, dass tatsächlich Möglichkeiten bestehen, mit denen unter Berücksichtigung der in der Studie zu Grunde gelegten ökonomischen Anforderungen langlebige Deckschichten entwickelt werden könnten. Eine dieser Möglichkeiten stellt die Verwendung

von Epoxydharz als Bindemittelzusatz bzw. einer teilweisen Substitution der gesamten Bitumenmenge im Asphaltmischgut und der dadurch entstehende „Epoxy Asphalt“ dar.

Im Rahmen dieser Arbeit soll nun untersucht werden, inwiefern ein solcher Epoxy Asphalt einen Beitrag zur Entwicklung eines hochstandfesten und langlebigen Asphaltdeckschichtbelages liefern kann.

Im Einzelnen sind daher folgende Fragestellungen zu bearbeiten:

- Welche Erfahrungen bestehen bereits im Umgang mit Epoxydharzen?
- Ist eine Verwendung von Epoxydharz im Heißasphalt grundsätzlich möglich?
- Welchen Einfluss auf grundlegende Bindemittel- und Asphalteigenschaften wie
 - Erweichungspunkt Ring und Kugel
 - Duktilität
 - Komplexer Schubmodul sowie Phasenwinkel
 - Tieftemperatureigenschaften
 - Verformungsbeständigkeit
 - Haftverhalten
 - Schichtenverbund
 - Ermüdungsbeständigkeit

hat es?

- Welche besonderen Vorkehrungen bzw. Maßnahmen sind bei der Mischgutherstellung und –verarbeitung zu beachten?
- Welche Chancen und Risiken birgt eine solche Modifizierung?

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Eigenschaften und Anwendungsgebiete von Epoxydharzen

2.1.1 Historische Entwicklung

Heutzutage werden Metalle, Holz und andere Werkstoffe immer mehr durch Kunststoffe ersetzt. Häufig ist für diese Substitution der Preis ausschlaggebend, oft aber die Tatsache, dass es heute Kunststoffe gibt, die sehr hohe mechanische und elektrische Eigenschaften wie auch Chemikalienbeständigkeit aufweisen, so dass neue, leichtere, praktischere und bessere Bauwerke möglich sind, als dies mit klassischen Werkstoffen der Fall war.

Vor der Jahrhundertwende waren alle damals bekannten Kunststoffe umgewandelte Naturprodukte wie z.B. vulkanisierter Kautschuk oder Zelluloid. Erst nach 1900 begann die Entwicklung der synthetischen Kunststoffe. Einer der ersten Kunststoffe war Phenol-Formaldehyd-Harz. Obwohl die Reaktion von Phenol mit Formaldehyd schon 1872 von A. Bayer beschrieben worden war, begann die industrielle Auswertung dieses Kunstharzes durch Baekeland im Jahre 1907 erst Jahrzehnte später unter dem Namen Bakelit.

Das Epoxydharz und dessen charakteristische Eigenschaften auf dem Kunststoffsektor wurden erstmalig im Jahre 1938 durch den Chemiker P. Castan erkannt. In seiner Funktion als Mitarbeiter einer schweizerischen zahntechnischen Produktionsfirma beschrieb er ein Harz, welches bei der Reaktion von Bisphenol A mit Epichlorhydrin entsteht sowie dessen Härtung mit Phthalsäureanhydrid und basischen Härtern in zwei von 1938 und 1943 datierenden Patentanmeldungen, die schon Andeutungen über eine spätere industrielle Anwendung auch außerhalb des Dentalgebietes enthielten. Die Erfindung führte zunächst zu einem Gießharz für Zahntechniker, das jedoch bald wieder aus dem Handel zurückgezogen wurde.

Im Jahre 1946 dehnte sich die Anwendung dieses Harzes auf das gesamte Gebiet der Kunststoffverarbeitung aus und erschien von diesem Zeitpunkt an in Form von Klebe-, Gieß- und Lackharzen unter der Bezeichnung Araldit auf dem Markt. Etwas später setzte die Entwicklung in den USA durch die Firmen Devoe & Reynolds und Shell auf dem Lacksektor ein.

Schon frühzeitig wurden auch in der metallverarbeitenden Industrie die hervorragenden Eigenschaften der Kunststoffe erkannt und zweckmäßige Anwendungsmöglichkeiten untersucht. Eine dieser Möglichkeiten beinhaltet das Herstellen von Werkzeug mit Hilfe von Epoxydharzen, womit versuchsweise etwa 1952 begonnen wurde. In erster Linie waren die Flug-

zeugwerke und dann die Automobilfirmen beteiligt, bei denen die wirtschaftlichen Vorteile von Epoxy-Gießharzen erkannt und in zunehmendem Maße genutzt wurden. Heute haben sich Epoxydharze in vielen Betrieben einen festen Platz erobert für den Bau von Werkzeugen und Vorrichtungen, die im allgemeinen Sprachgebrauch unter dem Sammelbegriff "Fertigungsmittel" verstanden werden.

2.1.2 Anwendungsbereiche

Epoxydharze zählen zur Stoffgruppe der Reaktionsharze. Sie sind nach DIN 16945 „flüssige oder verflüssigbare Harze, die für sich oder mit Reaktionsmitteln (Härter, Beschleuniger u. a.) ohne Abspaltung flüchtiger Komponenten durch Polyaddition bzw. Polymerisation härten“ [2]. Epoxydharze zeichnen sich durch hohe Festigkeit, gute elektrische Eigenschaften, gutes Haftungsvermögen auf vielen Oberflächen sowie einer guten Chemikalienbeständigkeit aus. Sie finden deshalb breite Anwendung als Vergussmassen für Isolatoren oder für Platinen in der Elektrotechnik, für strukturelle Lamine und als Klebstoffe in Verbundwerkstoffen sowie in vielen Bereichen des Oberflächen- und Korrosionsschutzes.

Die Anwendungsbereiche erstrecken sich unter anderem auf:

- Grundierungen und Beschichtungsmittel
- Vielseitiger Konstruktions-Klebstoff
- Umhüllungssysteme für Kondensatoren, Transformatoren, Drosseln und Spulen
- Fertigung von Isolatoren, Generatoren und Trockentransformatoren
- Herstellung von Bauteilen im Gussverfahren
- Einsatzstoffe für Betonsanierungen und Rissverpressungen
- Einsatz von Fugenmörtel für Fliesen und Pflaster
- Herstellung von Leiterplatten, Rotorblättern, Flugzeugteilen oder Sportgeräten
- Anstriche für schweren Korrosionsschutz (Schiffbau, Stahlkonstruktionen)
- Matrixmaterial für die Herstellung von Faserverbundbauteilen, unter anderem für Luft- und Raumfahrt, für den Motorsport und für den Yachtbau.



Abbildung 1: Leiterplatte aus Epoxydharz [3]

Wegen des geringen Aufwands für die Herstellung im Handlaminierverfahren und der hohen Festigkeit bei geringem Gewicht und den fast beliebigen Formgebungsmöglichkeiten ist Epoxydharz auch im privaten Modellbaubereich beliebt.

Auf Grund seiner Ungiftigkeit im ausgehärteten Zustand wird Epoxydharz auch sehr oft zum Terrarienbau verwendet. Da es flüssigkeitsundurchlässig ist, kann man es ebenso gut in Feuchtterrarien verwenden.

Im Yachtbau unterscheidet es sich von Polyesterharz dadurch, dass es zu keinen Osmoseschäden kommt. Auch dann nicht, wenn Seewasser durch eine beschädigte Gelcoat-Schicht dringt und mit dem Werkstoff in Berührung kommt. Deshalb wird Epoxydharz auch zur Reparatur von Osmoseschäden an Polyesterharz-Bootsrümpfen verwendet.

Epoxydharz ist beim jetzigen Stand der Technik nicht recyclingfähig und die Stoffe zu dessen Herstellung werden überwiegend aus Erdöl gewonnen. Es laufen aber bereits Versuche, Epoxydharz auf Basis nachwachsender Rohstoffe zu gewinnen. Ziel ist ein ungiftiges, geruchloses und nicht allergenes Epoxydharz zu entwickeln.

2.1.3 Zusammensetzung, Härtung und Verarbeitung

Epoxydharze werden durch Polymerisation von Grundharzen über geeignete Härter erzeugt. Die Polymerisation der Grundharze erfolgt über die für diese Kunststoffe namensgebende Epoxy-Gruppe. Mit zunehmendem Molekulargewicht der Grundharze und Kettenlängen von

$n > 1$ kann die Polymerisation auch zusätzlich über die Hydroxy-Gruppen erfolgen. Über die Zugabe von Härtern, die entweder katalytisch die Homopolymerisation der Harze initiieren oder als bifunktionelle H-acide Verbindungen mit den funktionellen Gruppen des Harzes reagieren, wird der Polymerisationsprozess durchgeführt. Epoxydharze werden somit grundsätzlich als 2-Komponentensysteme bestehend aus Harz und Härter angeboten. Die Komponenten werden je nach Anwendungsbereich in getrennten Gebinden wie auch in Mischungen geliefert.

Die Herstellung eines Epoxydharzes erfolgt durch Umsetzung von Bisphenol A mit Epichlorhydrin. Als Ergebnis entsteht eine Verbindung mit folgendem Molekülbau:

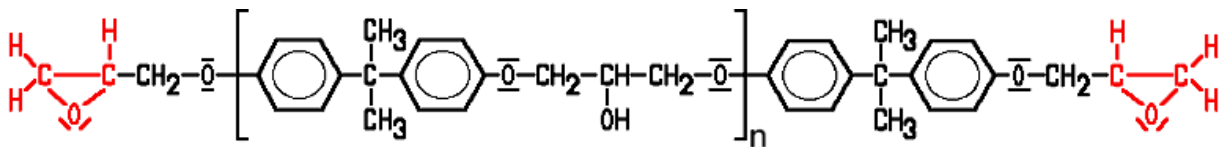


Abbildung 2: Molekül eines Epoxydharzes [3]

Die beiden Epoxy-Gruppen sind rot markiert. Bei einem 2-Komponentensystem reagieren diese mit dem Härter in einer Polyaddition (vgl. Abb. 3).

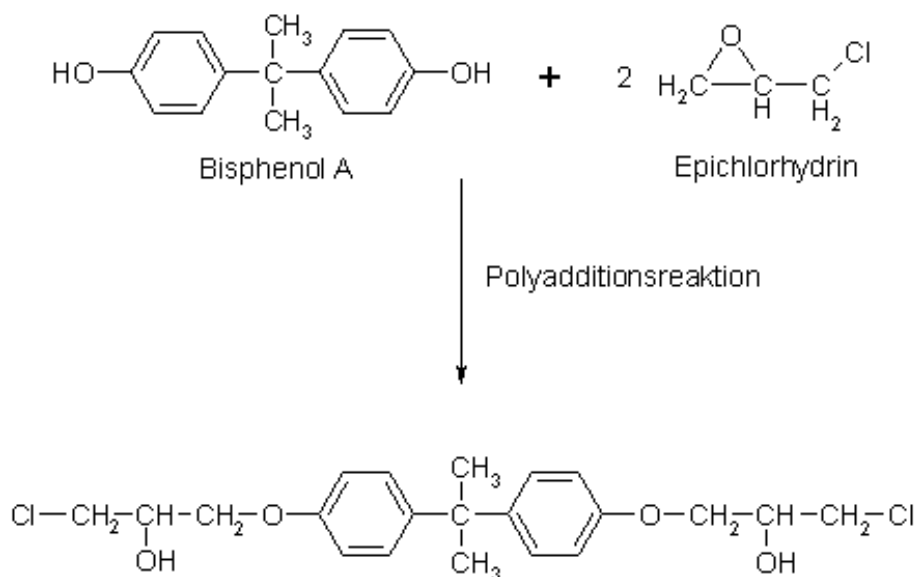


Abbildung 3: Polyaddition von Bisphenol A und Epichlorhydrin [4]

Die Aushärtung erfolgt exotherm durch Aufspaltung der Epoxy-Funktion. Dazu sind besonders Verbindungen wie Phenole, Alkohole, Thiole sowie primäre und sekundäre Amine geeignet. Des Weiteren kann die Aushärtung auch mit Carbonsäureanhydriden erfolgen. Sie erfordert jedoch die zusätzliche Wärmezufuhr von außen.

Bei der Härtung mit Aminen können sämtliche aktiven H-Atome nacheinander mit dem Epoxyd bis zur Bildung des tertiären Amins abreagieren. Die Härtung mit Polyaminen hat die wirtschaftlich größte Bedeutung. Sie härten schnell innerhalb weniger Stunden und bereits bei Raumtemperatur aus. Sie finden deshalb vor allem bei allen Arten von Beschichtungen Verwendung und werden dort als getrennte Harz-Härter-Systeme angeboten. Weniger verbreitet ist die Härtung über Carbonsäureanhydride. Sie sind im Vergleich zu den Polyaminsystemen weniger chemikalienbeständig, zeichnen sich aber durch größere Hitzestabilität aus.

Anders als bei Polyesterharz muss beim Anmischen von Epoxydharz normalerweise das vom Hersteller vorgegebene Harz/Härter Verhältnis eingehalten werden. Andernfalls verbleiben Teile von Harz oder Härter ohne Reaktionspartner, was klebrige Oberflächen und verminderte Festigkeit des Endprodukts zur Folge hat. Einige Epoxy-Systeme sind jedoch ausdrücklich für eine Variation des Mischungsverhältnisses innerhalb enger Grenzen geeignet. Dadurch lassen sich Härte, Elastizität und andere Eigenschaften beeinflussen. Eine inhomogene Mischung der Komponenten hat ähnlich negative Effekte wie ein falsches Verhältnis der Komponenten, da die Polymerisation nur unvollständig abläuft.

Die Verarbeitungsdauer von Reaktionsharzen wird Topfzeit genannt. Sie hängt von der Verarbeitungstemperatur, der Einstellung des Harzes und dem Verarbeitungsverfahren ab. Übliche Topfzeiten liegen bei einigen Minuten bis hin zu einigen Tagen. Während der Topfzeit steigt die Viskosität des Harzes in einer nichtlinearen Kurve immer weiter an, bis schließlich keine Verarbeitung mehr möglich ist. Daher sollte immer nur so viel Harz angesetzt werden, wie innerhalb der Topfzeit verbraucht werden kann.

Eine Erwärmung des angemischten Harzes auf ca. 50 °C verringert die Viskosität und verbessert dadurch im Allgemeinen die Verarbeitbarkeit, verkürzt aber auch die Topfzeit. Langsamreaktive Epoxydharze benötigen lange Härtezeiten und eine hohe Härtetemperatur. Bei Bedarf können Beschleuniger zugegeben werden, die die Reaktionszeit verkürzen. Epoxydharze können zum vollständigen Ausreagieren und zum Erreichen einer höheren Temperaturbeständigkeit nach der Aushärtung einem Temperierprozess unterzogen werden.

2.2 Bisherige Verwendung im Straßenbau

Die Verwendung von Epoxydharz im Bereich des Straßenbaus beschränkte sich in Deutschland in der Vergangenheit ausschließlich auf eine Kaltverarbeitung des 2-Komponentensystems. Als Einsatzgebiete sind hier die Halbstarren Deckschichten sowie Oberflächenbehandlungen auf Reaktionsharzbasis zu nennen.

Im Ausland, namentlich in den USA sowie in China, wurde Epoxy Asphalt auf vereinzelt Stahlbrücken als Fahrbahnbelag verwendet. Hier erfolgte eine Verarbeitung des Epoxydharzes im Heißasphalt.

2.2.1 Halbstarre Deckschichten

Bei Halbstarren Deckschichten handelt es sich um eine Kombinationsbauweise aus einem hohlraumreichen Asphaltträgergüst, dass mit einem speziellen für diesen Anwendungsfall zusammengesetztem Fließmörtel oder flexibilisiertem Epoxydharz verfüllt wird. Die Unterlage der Halbstarren Deckschicht ist gemäß „Merkblatt für die Herstellung von Halbstarren Deckschichten“ (M HD) [5] entweder eine Asphalttragschicht oder eine Asphaltbinderschicht (vgl. Abb. 4) und wird mit einem Bindemittel (z. B. Bitumenemulsion) versiegelt, damit das dünnflüssige Verfüllmedium nicht eindringen kann.

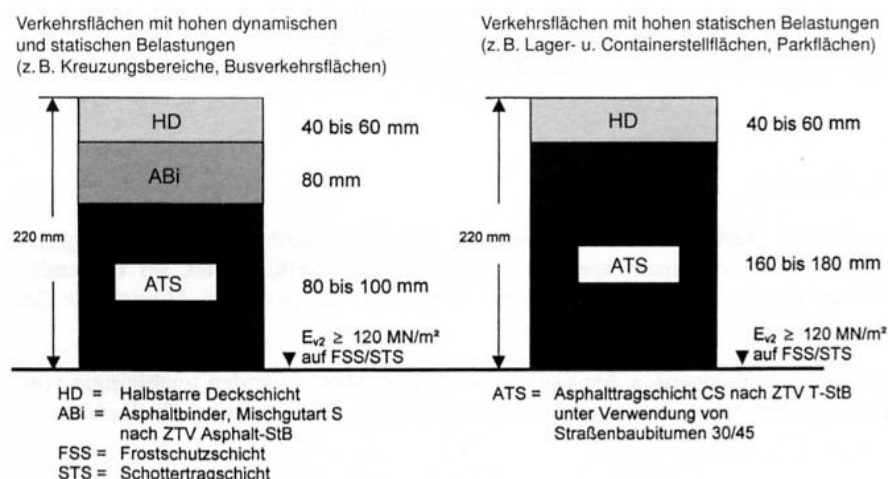


Abbildung 4: Halbstarre Deckschichten gemäß [5]

Halbstarre Deckschichten wurden bereits in den Siebziger Jahren in erster Linie auf Flugbetriebsflächen und Hafenanlagen eingesetzt. Ziel dieser Entwicklung war eine Kombination der positiven Eigenschaften des Asphaltes mit denen von Beton. Somit konnte die Flexibilität und Fugenlosigkeit von Asphalt mit der hohen Tragfähigkeit von Beton verbunden werden.

Für Fahrbahnbeläge auf Brücken sind Halbstarre Deckschichten mit hydraulisch gebundenem Mörtel jedoch auf Grund der Eigenschwingungen von Brücken- und Ingenieurbauwerken für hochbelastete Verkehrsflächen nicht geeignet. Hier würden sich wegen ihrer Steifigkeit und einem spröden Bruchverhalten schnell Risse bilden. Daher wird für solche Anwendungsfälle ein flexibilisiertes Epoxydharz als Verfüllmedium eingesetzt.

Weitere Anwendungsgebiete sind neben Container-Stellflächen, Recyclinghöfen und anderen hoch beanspruchten Flächen zunehmend auch Bushaltestellen (vgl. Abb. 5), Knotenpunkte sowie Ein- und Ausfahrten.



Abbildung 5: Halbstarre Deckschicht im Bereich einer Bushaltestelle

Grundsätzliche Eigenschaften und Merkmale von Halbstarren Deckschichten sind:

- Ein verformungsstabiler Belag mit hoher Festigkeit.
- Helle Oberfläche auf Grund des Verfüllmörtels.
- Flüssigkeitsdicht und chemikalienbeständig.
- Frostbeständig und widerstandsfähig gegenüber Tausalzen.

Eine zusätzliche Oberflächenbehandlung ist erforderlich, da durch die feine Struktur des Mörtels und des Mörtelfilms an der Oberfläche keine ausreichende Anfangsrauheit vorhanden ist.

2.2.2 Oberflächenbehandlungen auf Reaktionsharzbasis

Oberflächenbehandlungen auf Reaktionsharzbasis können sowohl auf Asphaltdeckschichten als auch auf Betondecken aufgebracht werden und sind im „Merkblatt für Griffigkeitsverbessernde Maßnahmen an Verkehrsflächen aus Asphalt“ [6] beschrieben.

Sie bestehen aus einem Zweikomponenten-Reaktionsharzbindemittel in Verbindung mit einer eingestreuten, hochpolierresistenten, kubischen Gesteinskörnung bis max. 4 mm Korngröße. Das Reaktionsharzbindemittel wird mit einer elektronisch gesteuerten Bindemittelverteilungsanlage dosiergenau im Niederdruckspritzverfahren auf die trockene Fahrbahn aufgetragen (vgl. Abb. 6).

Der frische Bindemittelfilm wird unmittelbar nach dem Aufbringen im Überschuss mit der Gesteinskörnung abgestreut (vgl. Abb. 7). Je nach eingesetzter Harzmenge werden die Körnungen 1/2 mm, 2/3 mm oder 3/4 mm eingesetzt.

Nach Aushärten des Reaktionsharzes werden die nicht gebundenen Gesteinskörner mit selbstaufnehmenden Kehrmaschinen entfernt. Die so hergestellte Oberfläche ist anschließend sofort befahrbar.

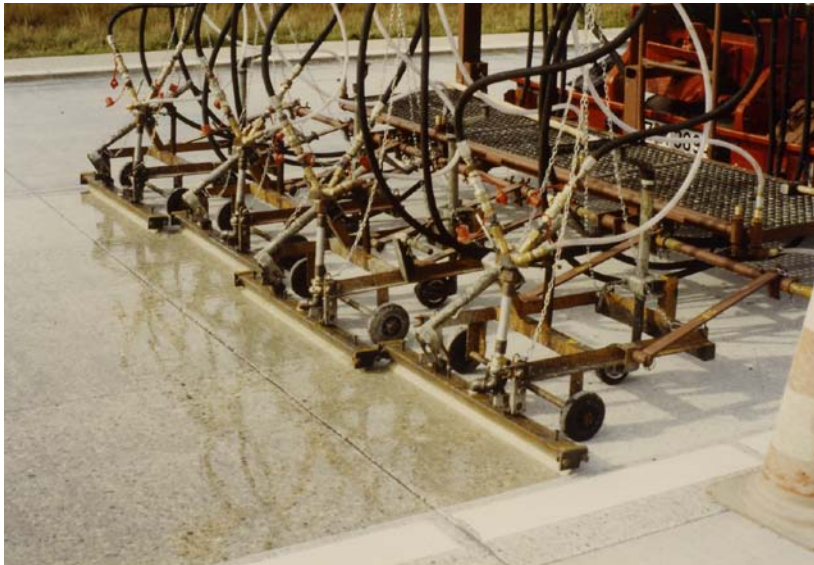


Abbildung 6: Auftragen des Bindemittels für Oberflächenbehandlungen auf Reaktionsharzbasis



Abbildung 7: Abstreuen des Bindemittels mit Gesteinskörnung

2.2.3 Epoxy Asphalt als Fahrbahnbelag auf Stahlbrücken

Bei dem in der Vergangenheit vor allem in den USA und in China als Brückenbelag zur Anwendung gekommenen Epoxy Asphalt handelt es sich um ein langsam härtendes Gemisch aus einem Epoxydharzbindemittel und herkömmlichen Gesteinskörnungen. Das Epoxydharzbindemittel ist ein chemisches 2-Komponentensystem bestehend aus einem Epoxydharz und einem vorgefertigten Bitumen-Härter-Gemisch, dessen Zusammensetzung nicht näher bekannt ist.

Eingebaut und verdichtet wurden die jeweiligen Schichten mit konventionellen Straßenbauwerkzeugen. Die endgültige Festigkeit des Epoxy Asphaltes wurde erst zwei bis vier Wochen nach Fertigstellung bei Umgebungstemperatur erreicht.

Ein typischer Schichtenaufbau eines Brückenbelages aus Epoxy Asphalt ist in Abbildung 8 dargestellt.

Epoxy Asphalt wurde erstmals in den späten 50er Jahren als Belag für treibstoff- und explosionsbeständige Oberflächen auf Flugplätzen eingesetzt. Im Jahre 1967 erfolgte der erste Einbau eines Brückenbelages auf der San Mateo-Hayward Brücke über die Bucht von San Francisco.

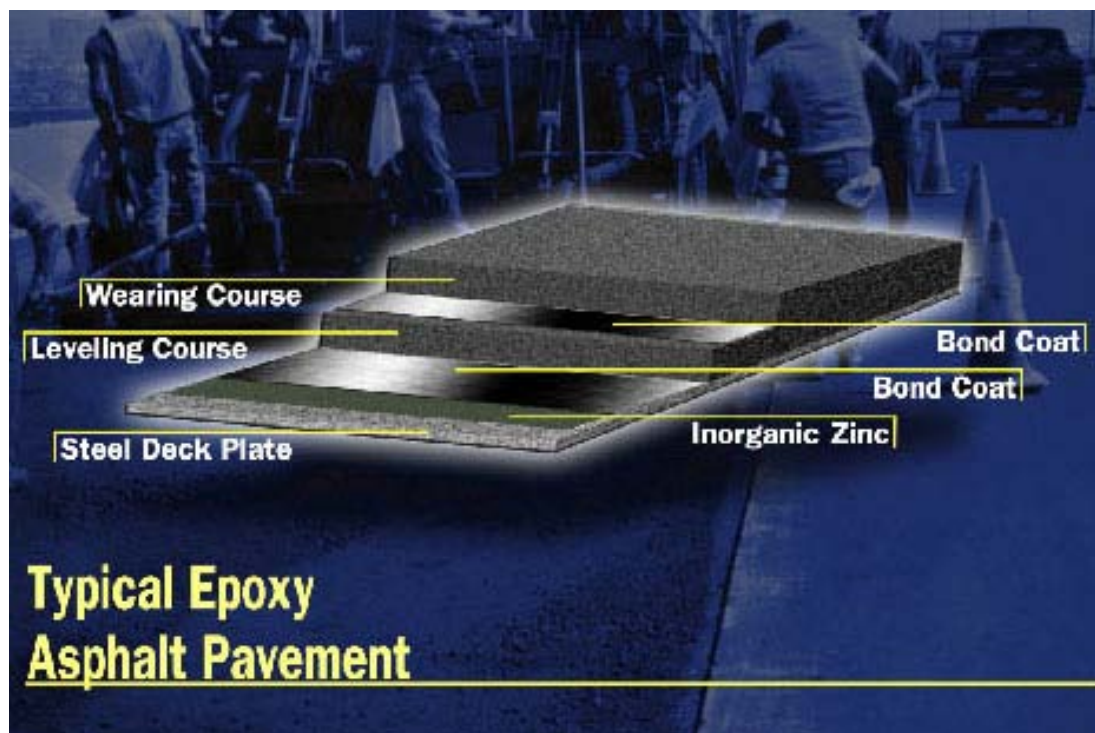


Abbildung 8: Schichtenaufbau eines Brückenbelages aus Epoxy Asphalt [32]

Neben einigen weiteren Belägen auf Stahlbrücken in den Vereinigten Staaten sind zwei durchgeführte Projekte in China besonders hervorzuheben:

Zum Ersten ist dort die Überquerung des Flusses Yangtze zu nennen, der die Stadt Nanjing durchfließt. Nanjing ist mit nahezu sechs Millionen Einwohnern eine der größten Städte Chinas, deren überwiegender Teil auf der südlichen Seite des Flusses liegt. Der nördliche Teil wuchs jedoch zunehmend schneller und machte somit im Jahre 2000 eine weitere Überquerung (eine erste existierte bereits 11 km flussabwärts) notwendig. Als Resultat errichtete man ein 1238 m langes und 30 m breites Brückenbauwerk (vgl. Abb. 9), dessen Oberflächenbelag aus Epoxy Asphalt ausgeführt wurde.



Abbildung 9: Brücke über den Yangtze bei Nanjing [7]

Als zweites Beispiel ist die Runyang-Brücke in China zu nennen, die ebenfalls den Fluss Yangtze zwischen Yangzhou und Zhenjiang überspannt. Auf dem insgesamt mehr als zwei Kilometer langen Bauwerk wurden auf Grund der bei Nanjing gemachten guten Erfahrungen etwa 9650 Tonnen Epoxy Asphalt auf einer Fläche von mehr als 67.000 m² eingebaut.

Für die Asphaltherstellung errichtete die Einbaufirma in unmittelbarer Nähe zur Brücke eine Mischanlage, die nur diese eine Maßnahme zu beliefern hatte. Somit konnten kurze Transportwege und -zeiten sichergestellt und eine unnötig schnelle Auskühlung des Mischgutes vermieden werden.

Eine ständige Kontrolle der Mischguttemperatur war wegen der fortschreitenden Aushärtung des Epoxydharzes zwingend erforderlich. Daher wurde in der Mischanlage das Mischgut nur in Chargen für genau einen Lkw hergestellt und sofort nach dem Verladen die Temperatur gemessen. Basierend auf dieser Temperatur wurde für jeden Lkw ein individueller Zeitplan erstellt, d. h. die minimale und die maximale Zeit, die das Mischgut auf dem Lkw verbleiben durfte, um noch ausreichend einbau- und verdichtbar zu sein. Vor Ort auf der Baustelle wurde dann anhand der Zeitpläne entschieden, welcher Lkw zu welchem Zeitpunkt sein Mischgut in den Fertiger entladen kann (vgl. Abb. 10).



Abbildung 10: Einbau von Epoxy Asphalt auf der Brücke von Runyang [8]

3 Untersuchungsmethodik

3.1 Vorgehensweise

Zu Beginn der Arbeiten wurde mit dem Splittmastixasphalt 0/11 S ein Asphaltdeckschichtmischgut gewählt, dass gemäß Tabelle 1.1 der ZTV Asphalt-StB 01 [9] als zweckmäßiges Mischgut für die Bauklassen SV, I bis III sowie für besondere Beanspruchungen verwendet wird.

Für die Untersuchung des Schichtenverbundes (vgl. Abschnitt 8.2.5) wurde für die Herstellung von Plattenpaketen ein Asphaltbindermischgut 0/22 S hergestellt.

Alle verwendeten Epoxydharze sowie die zugehörigen Härter sind marktübliche Produkte, die frei im Handel zu beziehen sind und vorab in keinsten Weise auf eine Verwendung im Heißasphalt modifiziert oder abgestimmt wurden.

Der grundlegende Unterschied zwischen einem konventionellen Asphalt und Epoxy Asphalt besteht darin, dass bei der Herstellung von Epoxy Asphalt das zu verwendende Bitumen durch eine Zugabe von Epoxydharz modifiziert wird, d. h. ein Teil der Gesamtbindemittelmenge durch Epoxydharz ersetzt wird. Da die Vielfalt der unterschiedlichen Epoxydharze wie zuvor beschrieben sehr groß ist, bedarf es eines methodischen Vorgehens hinsichtlich einer Identifizierung eines für den Untersuchungszweck geeigneten Epoxydharzes und dessen Einfluss auf die wichtigsten mechanischen Asphalteigenschaften.

Aus diesem Grund erfolgte die Bearbeitung der Arbeit in mehreren Phasen:

I. Grundlagenuntersuchungen mit unterschiedlichen Epoxydharzsystemen

Die erste Phase beinhaltete grundlegende Untersuchungen mit unterschiedlichen Epoxydharzsystemen. Dies waren im Einzelnen: ein Epoxydharzsystem mit Polyaminhärter, ein System mit Anhydridhärter ohne Verwendung eines Beschleunigers und eines mit Anhydridhärter unter Verwendung eines Beschleunigers.

Es wurden jeweils vier unterschiedliche Varianten untersucht: Eine Referenzvariante mit Straßenbaubitumen sowie drei Epoxy-Varianten (5%, 15% und 25% Epoxydharzzugabe bezogen auf die Gesamtbindemittelmenge). Ziel dieser Versuche war die Identifizierung des

Materialverhaltens im Asphaltmischgut, der dafür geeigneten Bedingungen sowie eine Bestimmung erster mechanischer Eigenschaften.

Nach Vorliegen all dieser Erkenntnisse sollte ein Epoxydharzsystem für die nachfolgenden Hauptuntersuchungen ausgewählt werden.

II. Hauptuntersuchungen mit einem ausgewählten Epoxydharzsystem

Die zweite Phase basierte auf den Erkenntnissen der Grundlagenuntersuchungen aus Phase I. Hier sollten die wichtigsten Bindemittel- und Mischgutkennwerte von Epoxy Asphalt mit Hilfe von standardisierten Prüfverfahren ermittelt und den Kennwerten von konventionellem Bindemittel bzw. Asphalt gegenübergestellt werden.

Die zur Anwendung gekommenen Prüfverfahren werden in Anhang 1 aufgeführt und deren Durchführung sowie die angesetzten Prüfbedingungen näher erläutert.

III. Weiterführende Untersuchungen

Im Zuge der Bearbeitung der ersten beiden Phasen stand zu erwarten, dass sich weitere spezielle Fragestellungen ergeben würden, die über den Rahmen der grundsätzlichen und standardisierten Prüfungen hinaus gehen. Um auch diesen Fragestellungen nachzugehen, wurden zusätzlich einige weiterführende Untersuchungen durchgeführt, deren Inhalte und Ergebnisse unter Abschnitt 10 zusammengefasst sind.

IV. Theoretische Beschreibung des Verformungsverhaltens

Nach Abschluss der Laboruntersuchungen wurde versucht, eine theoretische Beschreibung des dort festgestellten Verformungsverhaltens mithilfe von rheologischen Modellen vorzunehmen. Die Ergebnisse dieser Beschreibung sind unter Abschnitt 12 aufgeführt.

3.2 Baustoffe

3.2.1 Gesteinskörnungen

Für die Gesteinskörnungsgemische der hergestellten Asphalte wurde für das Deckschichtmischgut (SMA 0/11 S) sowohl im Korngrößenbereich > 2 mm als auch für den Brechsand Diabas aus dem Diabaswerk Blasbach in Wetzlar verwendet. Für das benötigte Asphaltbindeermischgut 0/22 S kam ein Basalt zum Einsatz.

Als Füller wurde jeweils ein Kalksteinmehl der Firma Kalksteinwerk Medenbach GmbH verwendet.

Die Rohdichten der verwendeten Gesteinskörnungen können der Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Rohdichten der verwendeten Gesteinskörnungen

Kornklasse [mm]		< 0,09	0/2	2/5	5/8	8/11	11/16	16/22
Rohdichte [g/cm ³]	Diabas	-	2,807	2,867	2,805	2,831	-	-
	Basalt	-	2,972	3,018	3,003	3,014	3,007	3,009
	Kalksteinmehl	2,713						

3.2.2 Bindemittel

Die für die Asphaltmischungen verwendeten Bitumen waren ein Straßenbaubitumen 30/45 und 50/70 der Firma Total sowie ein polymermodifiziertes Bitumen PmB 45 A der Firma Elf.

Die Kennwerte der eingesetzten Bitumen sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Kennwerte der verwendeten Bindemittel

Kennwert	Penetration [mm/10]	Erweichungs- punkt RuK [°C]	Brechpunkt nach Fraass [°C]	Dichte [g/cm ³]
30/45	34	57,5	-7,7	1,041
50/70	68	50,9	-14,1	1,037
PmB 45 A	47	60,7	-19,4	1,023

Für die Modifizierung des Bindemittels in den Epoxy Asphalt-Mischungen kamen zwei unterschiedliche Epoxydharzsysteme zur Anwendung. Beides waren Standardprodukte, die frei auf dem Markt zu beziehen sind.

Das Epoxydharzsystem mit Polyaminhärter bestand aus einem universell einsetzbaren Epoxydharz auf Bisphenol-A-Basis und einem Härter mit modifiziertem aliphatischem Amin und geringer Exothermie.

Bei dem Epoxydharzsystem mit Anhydridhärter handelte es sich um ein unmodifiziertes Standard-Epoxydharz auf Bisphenol-A-Basis sowie um einen cycloaliphatischen Dicarbonsäureanhydridhärter, der zur Heißhärtung flüssiger Epoxydharze für die Herstellung von mechanisch hochwertigen Formstoffen eingesetzt wird. Der für dieses System verwendete Beschleuniger war ein polyfunktionelles, tertiäres Amin.

Die Kennwerte der verwendeten Epoxydharze, Härter und des Beschleunigers können den Tabellen 3, 4 und 5 entnommen werden.

Als Bindemittelträger wurden 0,3% Cellulosefasern als stabilisierender Zusatzstoff dem Splittmastixasphaltnischgut hinzugefügt.

Tabelle 3: Kennwerte der verwendeten Epoxydharze

Eigenschaft	Einheit	Harz für Polyaminsystem	Harz für Anhydridsystem
Epoxydwert	mg KOH/g	$0,53 \pm 0,02$	$0,535 \pm 0,015$
Viskosität bei 25°C	MPa*s	12000 ± 2000	10000 ± 2000
Dichte bei 25°C	g/cm ³	1,17	$1,17 \pm 0,01$
Farbzahl	Gardner	≤ 1	< 3

Tabelle 4: Kennwerte der verwendeten Härter

Eigenschaft	Einheit	Härter für Polyaminsystem	Härter für Anhydridsystem
Aminzahl / Anhydridäquivalent	mg KOH/g	280 ± 10	178
Viskosität bei 25°C	MPa*s	15 ± 10	240 ± 40
Dichte bei 25°C	g/cm ³	0,94	$1,24 \pm 0,02$
Farbzahl	Gardner	≤ 1	≤ 3

Tabelle 5: Kennwerte des verwendeten Beschleunigers

Eigenschaft	Einheit	Beschleuniger für Polyaminsystem	Beschleuniger für Anhydridsystem
Viskosität bei 25°C	MPa*s	-	250 ± 50
Dichte bei 25°C	g/cm ³	-	$0,98 \pm 0,02$
Farbzahl	Gardner	-	< 8

3.3 Eignungsprüfungen

Im Rahmen einer konventionellen Eignungsprüfung wurde gemäß dem „Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt“ [10] für den Splittmastixasphalt eine Rezeptur ermittelt, die hinsichtlich der Vergleichbarkeit der zu ermittelnden Ergebnisse über die gesamte Versuchsreihe unverändert blieb. Somit konnte der Einfluss unterschiedlicher Mischgutzusammensetzungen auf die Asphalteigenschaften ausgeschlossen und einzig die Wirkung des Epoxydharzes im Asphalt bewertet werden.

Für das Asphaltbindermischgut wurde ebenfalls im Rahmen einer konventionellen Eignungsprüfung eine Rezeptur gemäß ZTV Asphalt-StB 01 ermittelt.

Die Ergebnisse der Eignungsprüfungen können den Tabellen 6 und 7 entnommen werden. Die Korngrößenverteilungen beider Mischgutarten sind in den Abbildungen 11 und 12 dargestellt.

Tabelle 6: Eignungsprüfung für SMA 0/11 S

SMA 0/11 S			
Gesteinskörnungsgemisch			
Lieferkörnung			Resultierende Korngrößenverteilung
Diabas	8/11	[M.-%]	48,3
	5/8	[M.-%]	18,5
	2/5	[M.-%]	12,2
	0/2	[M.-%]	8,5
Kalksteinmehl	<0,09	[M.-%]	12,5
mittlere Gesteinsrohddichte		[g/cm³]	2,813
Bindemittel			
Bindemittelsorte	[-]	50/70	PmB 45 A
Bindemitteldichte	[g/cm³]	1,0367	1,0230
Bindemittelgehalt	[M.-%]	7,0	7,0
Mischgut			
Rohddichte	[g/cm³]	2,5011	2,4890
Raumddichte	[g/cm³]	2,4217	2,4111
Hohlraumgehalt	[Vol.-%]	3,17	3,13
Bindemittelvolumen	[Vol.-%]	16,49	16,49
fiktiver Hohlraumgehalt	[Vol.-%]	19,67	19,62
Ausfüllungsgrad	[%]	83,87	84,05

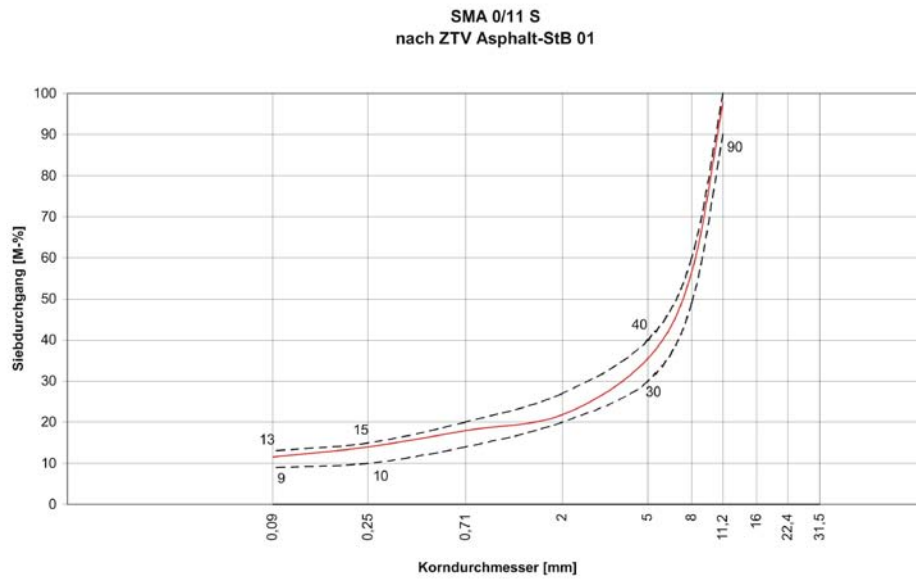


Abbildung 11: Korngrößenverteilung SMA 0/11 S

Tabelle 7: Eignungsprüfung Asphaltbinder 0/22 S

Asphaltbinder 0/22 S			
Gesteinskörnungsgemisch			
Lieferkörnung			Resultierende Korngrößenverteilung
Basalt	16/22	[M.-%]	40,0
	11/16	[M.-%]	5,0
	8/11	[M.-%]	10,0
	5/8	[M.-%]	10,0
	2/5	[M.-%]	10,0
	0/2	[M.-%]	20,0
Kalksteinmehl	<0,09	[M.-%]	5,0
mittlere Gesteinsrohddichte		[g/cm³]	2,971
Bindemittel			
Bindemittelsorte		[-]	30/45
Bindemitteldichte		[g/cm³]	1,0410
Bindemittelgehalt		[M.-%]	4,1
Mischgut			
Rohddichte		[g/cm³]	2,7358
Raumddichte		[g/cm³]	2,5577
Hohlraumgehalt		[Vol.-%]	6,51
Bindemittelvolumen		[Vol.-%]	10,10
fiktiver Hohlraumgehalt		[Vol.-%]	16,61
Ausfüllungsgrad		[%]	60,80

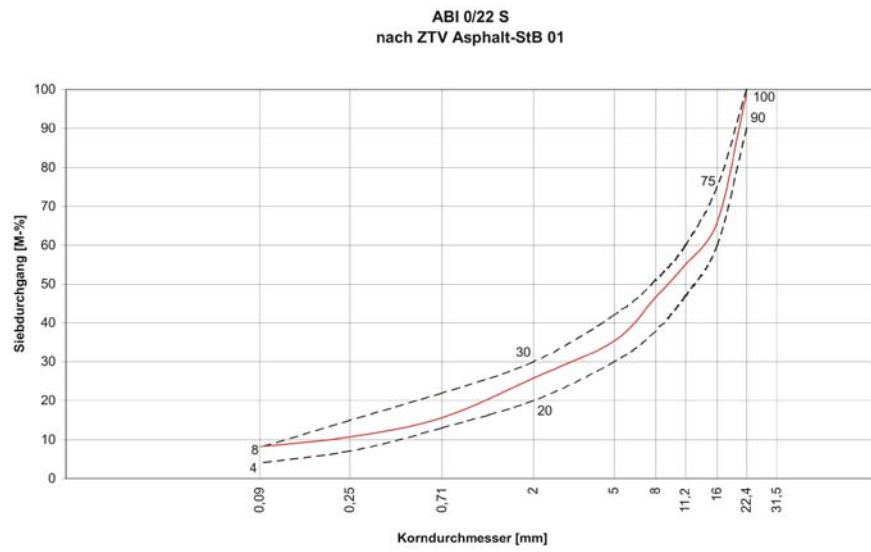


Abbildung 12: Korngrößenverteilung Asphaltbinder 0/22 S

3.4 Mischgut- und Probekörperherstellung

Die Mischgutherstellung erfolgte in einem Labormischer mit einer Kapazität von 35 Litern (vgl. Abb. 13). Die getrockneten Gesteinskörnungen wurden entsprechend der Rezeptur eingewogen und auf eine Temperatur von 5°C über der gewünschten Mischtemperatur erhitzt. Anschließend wurden die jeweiligen Kornfraktionen in den Labormischer gegeben und zwei Minuten trocken gemischt.



Abbildung 13: Labormischer

Das Bindemittel wurde in abgedeckten Eimern ebenfalls erhitzt und vor der Zugabe in den Mischer einmal aufgerührt. Die Bindemittelzugabe wurde portionsweise so lange fortgesetzt, bis mittels Differenzwägung die Sollbindemittelmenge erreicht wurde.

Bei der Mischgutherstellung von Epoxy Asphalt erfolgte vor der Bindemittelzugabe das Vermischen des Bitumens mit den Epoxydharzkomponenten. Hierzu wurden zunächst die verwendeten Komponenten (Harz, Härter und ggf. Beschleuniger) in den laut Datenblatt vorgeschriebenen Anteilen vermengt. Anschließend folgte die Zugabe des Epoxydharzgemisches in das heiße Bitumen. Um eine möglichst homogene Verteilung des Epoxydharzes im Bitumen zu gewährleisten, wurde dieses Bindemittelgemisch mit Hilfe eines Rührgerätes verquirlt (vgl. Abb. 14). Unmittelbar danach wurde die Bindemittelzugabe in den Labormischer

wie oben beschrieben durchgeführt. Ab Beginn der Bindemittelzugabe wurde der Asphalt für vier Minuten gemischt.



Abbildung 14: Vermischen von Bitumen und Epoxydharz

Für die vorgesehenen Prüfungen wurden sowohl Marshall-Probekörper als auch Probeplatten mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (vgl. Abb. 15) hergestellt.

Die Verdichtung der Marshall-Probekörper erfolgte gemäß DIN 1996 Teil 4 [11] durch zweimal 50 Schläge.

Die Verdichtung der Probeplatten erfolgte gemäß ALP A-StB Teil 11 [12] und wurde wegge-regelt gesteuert. Hierbei ist es möglich, bei genauer Berechnung der Mischguteinwaage den gewünschten Hohlraumgehalt bzw. die gewünschte Raumdichte und damit den Verdich-tungsgrad der Asphaltplatte zu erreichen. Die Anforderungswerte für diese Kennwerte liegen gemäß ZTV Asphalt-StB 01 bei einem maximalen Hohlraumgehalt von 6,0 Vol.-% und einem minimalen Verdichtungsgrad von 97%.

Die Parameter der weggeregelten Verdichtung wurden wie folgt eingestellt:

Vorlast: 1,0 kN

Rampe: 0,5 mm je Walzübergang

Glätten: 20 Walzübergänge

Temperatur Segment/Formkasten: 80°C



Abbildung 15: Walzsektor-Verdichtungsgerät

3.5 Prüfverfahren

Eine Beschreibung der im Rahmen dieser Arbeit angewandten Prüfverfahren kann dem Anhang 1 entnommen werden.

I.

**Grundlagenuntersuchungen
mit unterschiedlichen Epoxydharzsystemen**

4 Untersuchungen mit einem Epoxydharzsystem mit Polyaminhärter

4.1 Handmischungen

Die Untersuchungen mit dem Epoxydharzsystem mit Polyaminhärter beschränkten sich zunächst auf Marshall-Probekörper, die in kleinen Handmischungen hergestellt wurden. Hierbei wurde das Mischgut für jeden Probekörper bei einer Temperatur von 130°C einzeln gemischt und anschließend sofort verdichtet. Der Anteil an Epoxydharz betrug 25% der gesamten Bindemittelmenge.

Ziel dieses Vorgehens war eine erste Einschätzung über den Einfluss des Epoxydharzes auf das Mischgut während der Mischgutherstellung. Diesbezüglich waren keine Auffälligkeiten festzustellen und auch sämtliche Kennwerte der Probekörper erfüllten die Anforderungen gemäß ZTV Asphalt-StB 01.

An diesen Marshall-Probekörpern wurde anschließend mittels dynamischem Druckschwellversuch die Verformungsbeständigkeit bestimmt, um über den Einfluss des Harzes auf die Verformungsbeständigkeit des Asphaltes ebenfalls eine erste Einschätzung zu erhalten. Das Ergebnis eines Probekörpers ist in Abbildung 16 dargestellt. Die geringe Verformung von weniger als 0,2 mm nach 10.000 Lastwechseln lässt auf eine positive Wirkung auf die Verformungsbeständigkeit schließen.

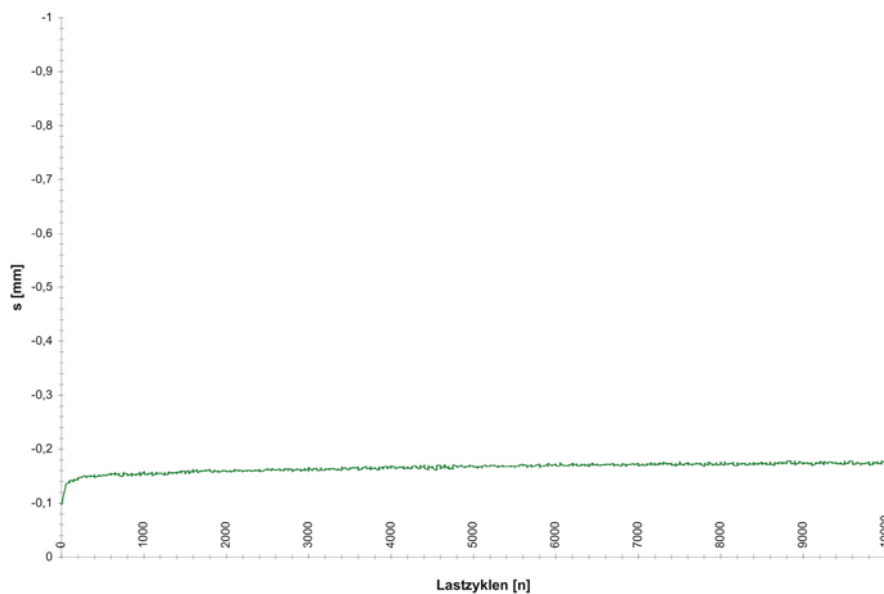


Abbildung 16: Ergebnis eines Druckschwellversuches an einem ersten Epoxy-Probekörper (polyamin)

4.2 Mischgutherstellung im Labormischer

Nachdem eine grundsätzliche Mischbarkeit des Epoxydharzsystems im Asphalt durch Handmischungen festgestellt wurde, sollte nun eine Mischgutherstellung in einem größeren Maßstab, d. h. im Labormischer, überprüft werden. Die Herstellung erfolgte entsprechend dem unter Abschnitt 3.4 beschriebenen Vorgehen.

In einem ersten Schritt wurde erneut ein Epoxy-Gehalt von 25% gewählt, da es sich hierbei um die „ungünstigste“ Variante mit dem größten Anteil an Epoxydharz handelt. Aus dem vorhandenen Mischgut wurden unmittelbar nach Beenden des Mischvorgangs drei Marshall-Probekörper (MPK) hergestellt. Die erste gewählte Verarbeitungstemperatur für die Mischgut- und Probekörperherstellung betrug 135°C, da diese der Verdichtungstemperatur gemäß ZTV Asphalt-StB 01 bzw. ALP A-StB Teil 11 entspricht.

Bereits bei der ersten Mischung musste festgestellt werden, dass bei den gewählten Bedingungen die Reaktion zwischen Harz und Härter zu schnell abläuft. Die beiden Komponenten reagieren unmittelbar miteinander und versteifen somit das Mischgut in zunehmendem Maße. Daraufhin wurde die Verarbeitungstemperatur kontinuierlich bis auf 100°C abgesenkt und weitere Mischungen bei niedrigeren Temperaturen ausgeführt. Die Ergebnisse (Raumdichten und Hohlraumgehalte der MPK) sind in den Abbildungen 17 und 18 dargestellt.

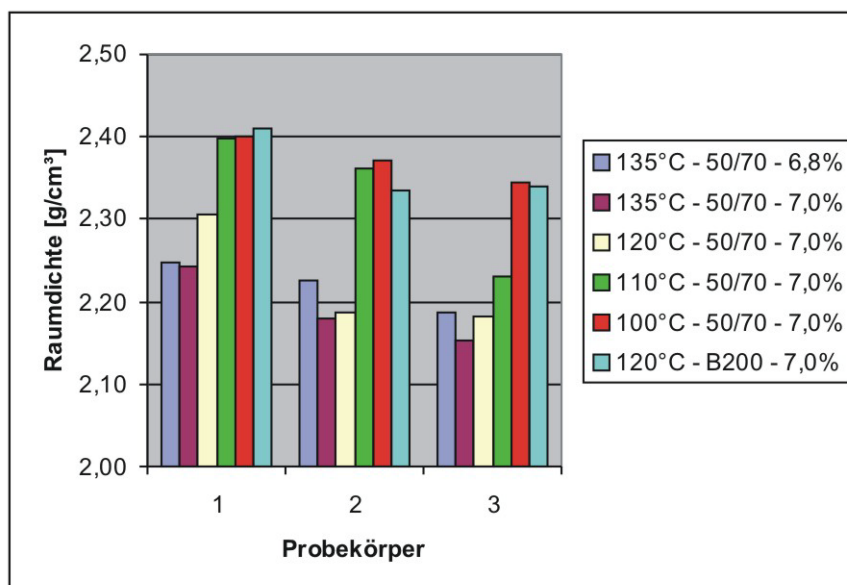


Abbildung 17: Raumdichten von drei nacheinander verdichteten MPK aus Epoxy Asphalt (polyamin)

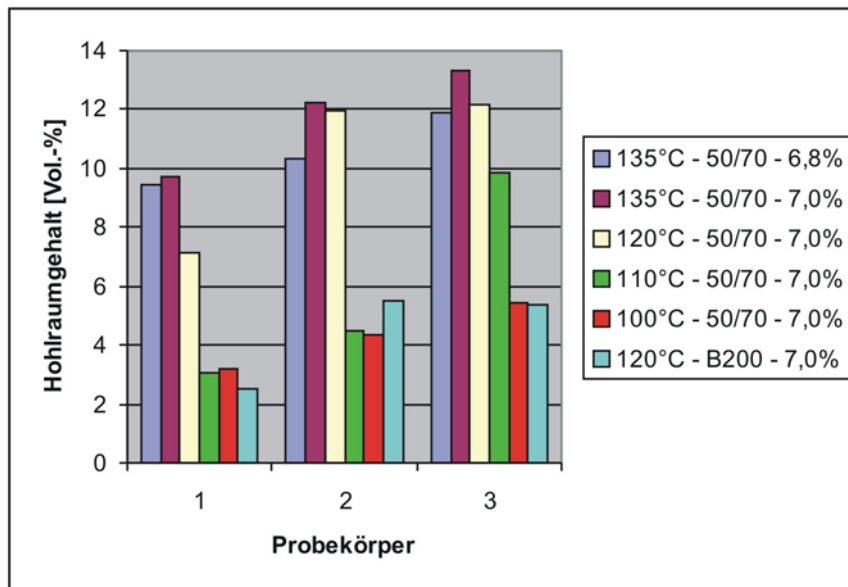


Abbildung 18: Hohlraumgehalt von drei nacheinander verdichteten MPK aus Epoxy Asphalt (polyamin)

Neben der Temperaturabsenkung wurde ebenfalls bei 135°C der Bindemittelgehalt um 0,2 Vol.-% verringert und bei 120°C eine Mischung mit einem Straßenbaubitumen B200 durchgeführt.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen die festgestellte Problematik des zu schnell aushärtenden Epoxydharzsystems sehr deutlich. Die Verdichtung der drei Marshall-Probekörper erfolgte unmittelbar nacheinander, d. h. in einem Zeitraum von wenigen Minuten. Innerhalb dieser kurzen Zeit nimmt jedoch die Raumdichte von Probekörper zu Probekörper für jede der gewählten Verarbeitungstemperaturen stetig ab. Ab einer Temperatur von 110°C ist das Niveau der Raumdichten zwar höher, die stetige Abnahme aufgrund des mit der Zeit rasch aushärtenden Epoxydharzes bleibt jedoch erhalten. Die Verläufe der Hohlraumgehalte verhalten sich dementsprechend gegenläufig.

Auch die Reduzierung des Bindemittelgehaltes und die Verwendung eines Straßenbaubitumens B200 bei niedrigeren Temperaturen konnten die Problematik der schnellen Reaktion von Harz und Härter nicht kompensieren.

5 Untersuchungen mit einem Epoxydharzsystem mit Anhydridhärter ohne Verwendung eines Beschleunigers

5.1 Handmischungen

Die Untersuchungen mit dem Epoxydharzsystem mit Anhydridhärter ohne Verwendung eines Beschleunigers beschränkten sich zunächst ebenfalls auf die Herstellung von Marshall-Probekörper aus kleinen Handmischungen. Da es sich hier um ein sogenanntes heißhärten- des System handelt, wurde als erste Verarbeitungstemperatur 150°C gewählt, um die Bedingungen bei der Herstellung von konventionellem Asphaltmischgut möglichst nicht zu verändern. Der Anteil an Epoxydharz betrug 25% der gesamten Bindemittelmenge.

Diese Bedingungen führten jedoch zu einer starken Dampf- und Rauchentwicklung sowie zu einer schlechten Verarbeitbarkeit des Mischgutes. Daraufhin wurde die Verarbeitungstemperatur schrittweise abgesenkt und weitere Probemischungen durchgeführt. Hieraus resultierte eine labortechnisch praktikable und handhabbare Verarbeitungstemperatur von 130°C.

Abschließend sollte noch die Frage einer eventuellen Veränderung der Verarbeitbarkeit nach einer Lagerung des Mischgutes bei konstanter Temperatur geklärt werden. Hierzu wurde ein erster Marshall-Probekörper sofort nach der Mischgutherstellung verdichtet, wohingegen das Mischgut für einen zweiten Probekörper für 30 Minuten bei 130°C im Ofen belassen und anschließend erst verdichtet wurde. Die Verarbeitbarkeit des Mischgutes hatte sich während dieser Zeit nicht negativ verändert und die Raumdichten der beiden Probekörper waren nahezu identisch.

Die Dampfentwicklung, die bei 130°C zwar schwächer, aber dennoch vorhanden war, führte dazu, dass alle nachfolgenden Arbeiten während der Mischgut- und Probekörperherstellung mit Atemschutzmasken durchgeführt wurden.

5.2 Mischgutherstellung im Labormischer

Die für die Handmischungen geeigneten Herstellbedingungen wurden in einem zweiten Schritt auf den Maßstab des Labormischers übertragen. Hierzu wurde Epoxy Asphalt mit einem Epoxy-Anteil von 25% bei einer Temperatur von 130°C gemischt und drei Marshall-Probekörper sofort verdichtet sowie drei weitere erst 30 Minuten nach der Mischgutherstel-

lung. Hierbei war festzustellen, dass auch nach einer Temperierung bei 130°C für 30 Minuten das Mischgut noch immer gut zu verarbeiten war und keine Versteifung durch einen zu raschen Aushärtprozess eingesetzt hatte.

Bereits im Vorfeld dieser Mischung stellte sich die Frage, ob der Zeitpunkt der Verarbeitung (sofort oder nach einer Temperierphase) einen Einfluss auf die Verformungsbeständigkeit des Asphaltes haben könnte. Daher wurden neben den bereits erwähnten Marshall-Probekörpern auch zwei WSV-Platten sofort und nach 30 Minuten hergestellt. An diesen Platten wurde die Verformungsbeständigkeit mittels Spurbildungsversuch entsprechend Anhang 1 geprüft. Der Verlauf der Spurrinnentiefe beider Platten ist in Abbildung 19 dargestellt.

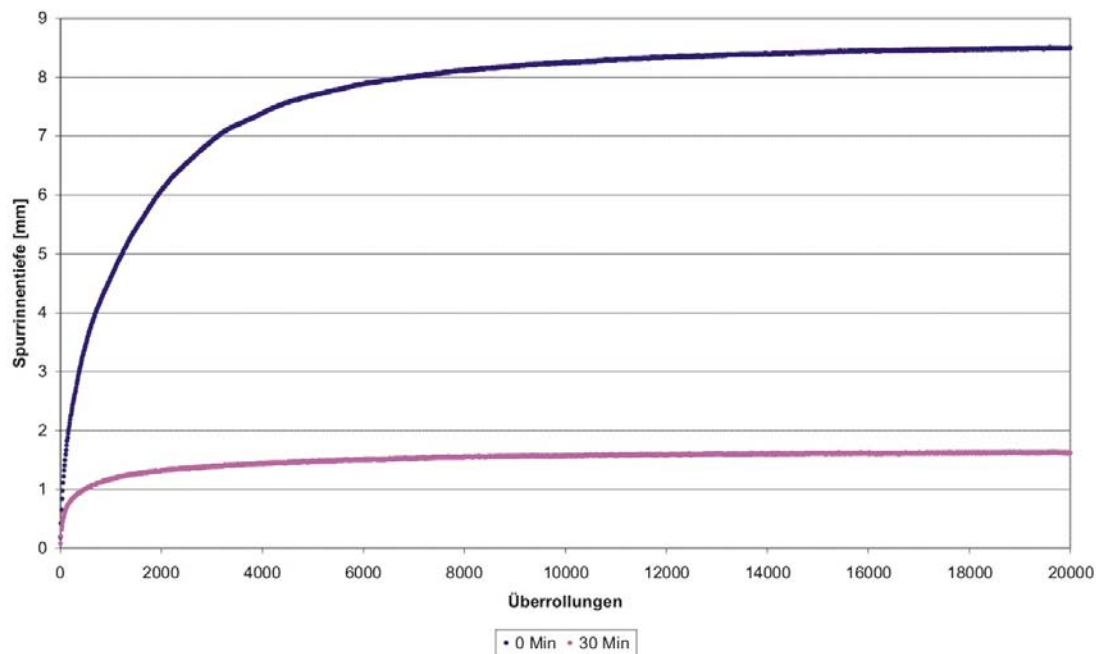


Abbildung 19: Spurrinnentiefe in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probekörperherstellung

An dem dargestellten Verlauf der Spurrinnentiefen beider Platten ist deutlich der Einfluss der 30minütigen Temperierphase zu erkennen. Während die sofort nach Mischgutherstellung verdichtete Platte nach 20.000 Überrollungen eine Spurrinnentiefe von etwa 8,5 mm aufwies, waren bei der nach 30 Minuten verdichteten Platte nur etwa 1,7 mm zu verzeichnen. Somit konnte nachgewiesen werden, dass ein erheblicher Einfluss des Verdichtungszeitpunktes auf die Verformungsbeständigkeit des Epoxy Asphaltes besteht, da unmittelbar nach Mischgutherstellung die Reaktion von Harz und Härter noch nicht stattgefunden hat.

An dieser Stelle war jedoch noch nicht bekannt, wie lange eine solche Temperierung vorzusehen ist, damit eine vollständige Reaktion der beiden Komponenten gewährleistet ist. Daher erfolgte im Anschluss eine systematische Untersuchung dieser Fragestellung, um auch eindeutig definierte Bedingungen für eine eventuelle Probekörperherstellung im Rahmen der Hauptuntersuchungen zu schaffen.

Für diesen Zweck wurde Epoxy Asphalt in den Varianten 5%, 15% und 25% gemischt und jeweils WSV-Platten nach unterschiedlich langen Temperierzeiten bei 130°C hergestellt. Die Verdichtung erfolgte sofort, 15, 30, 45 und 60 Minuten nach Öffnen des Mixers. Hiernach wurde an sämtlichen Probekörpern ein Spurbildungsversuch gemäß Anhang 1 durchgeführt und die Spurrinnentiefe nach 20.000 Überrollungen aller Varianten miteinander verglichen.

Die Ergebnisse der Spurbildungsversuche können den nachfolgenden Abbildungen entnommen werden.

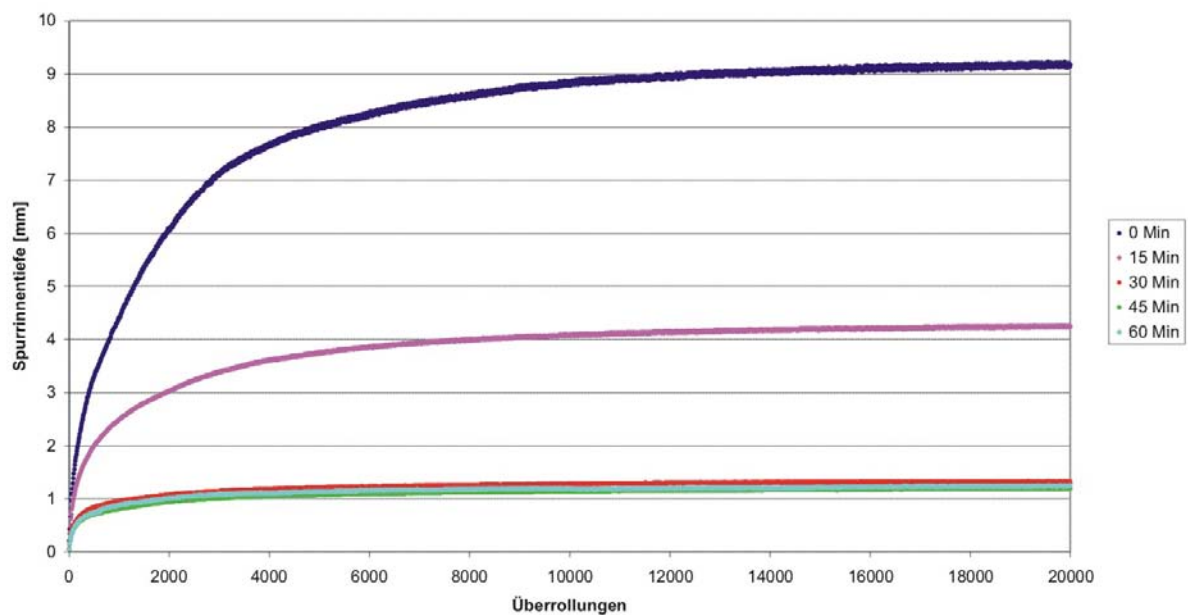


Abbildung 20: Spurrinnentiefe bei 25% Epoxy ohne Beschleuniger in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probekörperherstellung

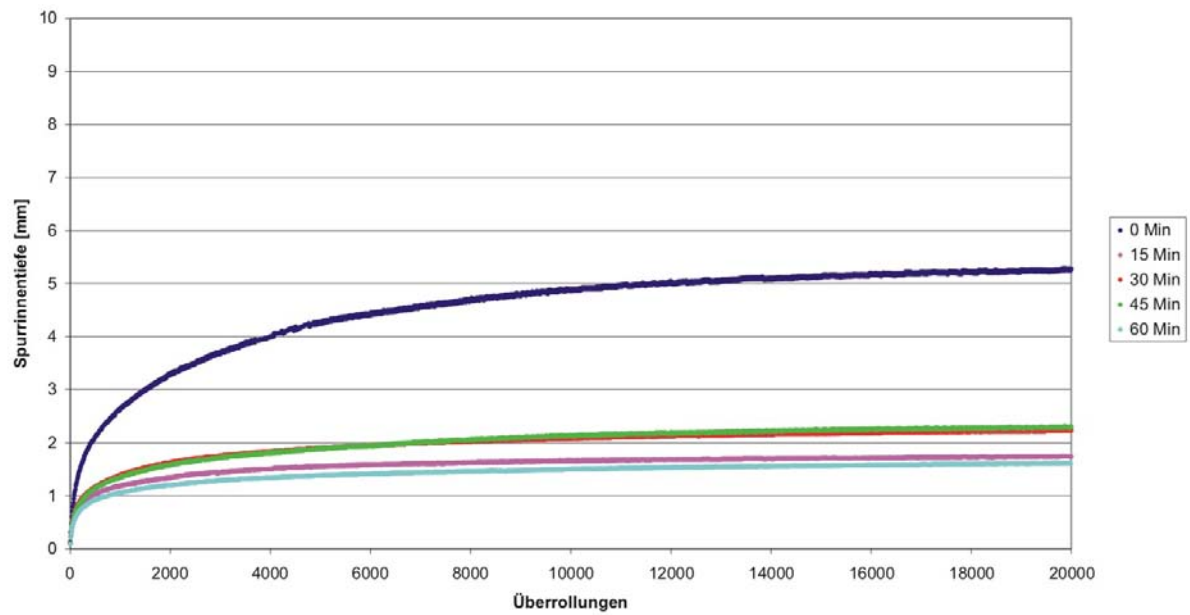


Abbildung 21: Spurrinnentiefe bei 15% Epoxy ohne Beschleuniger in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probekörperherstellung

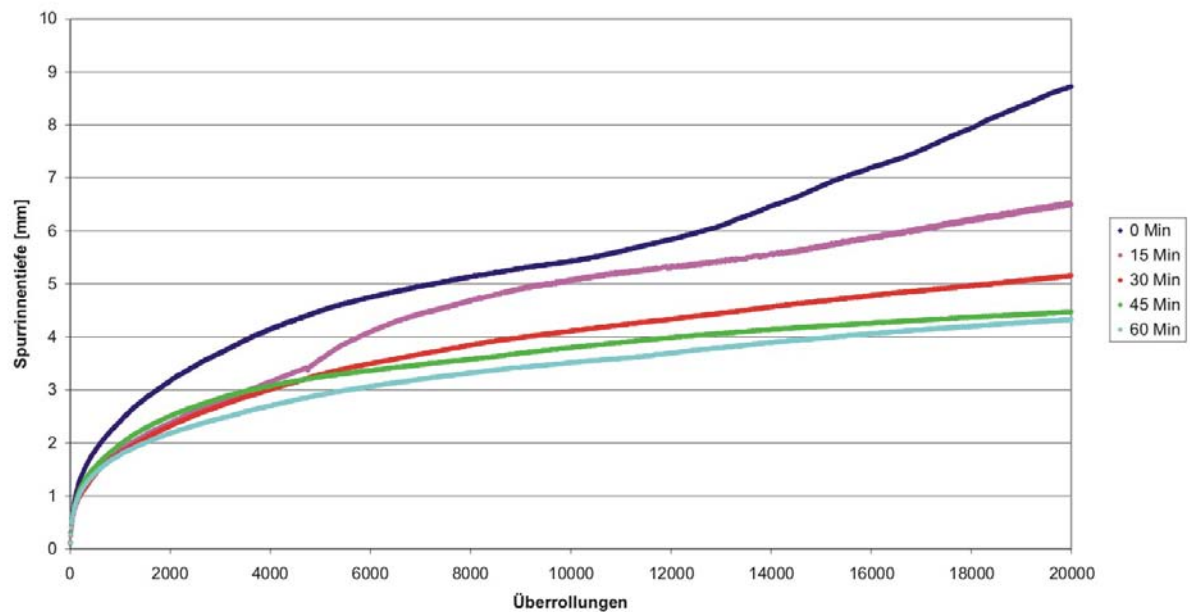


Abbildung 22: Spurrinnentiefe bei 5% Epoxy ohne Beschleuniger in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probekörperherstellung

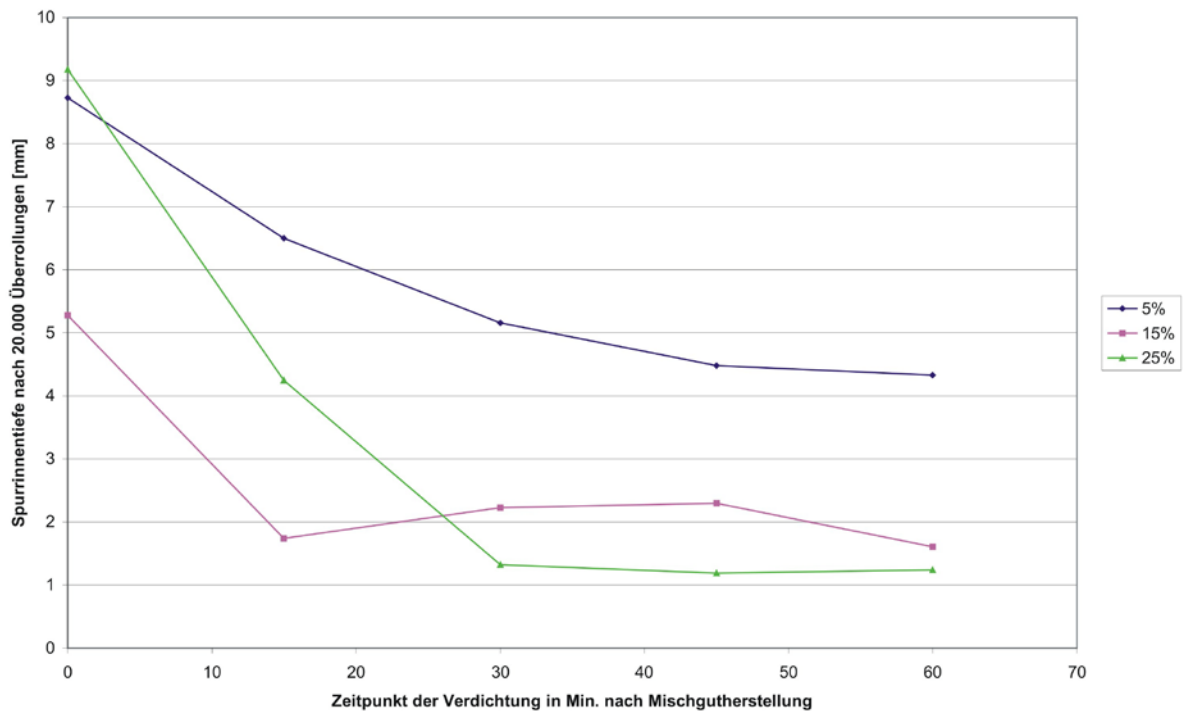


Abbildung 23: Spurrinnentiefe nach 20.000 Überrollungen in Abhängigkeit vom Verdichtungszeitpunkt ohne Beschleuniger

Bei der Verdichtung des Mischgutes mit 25% Epoxydharzanteil war nach 45 Minuten eine beginnende Versteifung festzustellen, die sich in einem leicht erhöhten Verdichtungsaufwand widerspiegelte. Nach 60 Minuten war diese nochmals weiter fortgeschritten und auch der Verdichtungswiderstand nochmals erhöht. Somit war festzustellen, dass eine Temperierphase für die Aushärtung des (hier verwendeten) Epoxydharzes zwar notwendig ist, diese jedoch nicht länger als 45 bis 60 Minuten andauern darf, um eine ausreichende Verarbeitbarkeit des Mischgutes zu erhalten.

Betrachtet man die ermittelten Spurrinnentiefen nach 20.000 Überrollungen aller Varianten, so ist festzustellen, dass für die Varianten 25% und 15% Epoxy eine Temperierzeit des Mischgutes von 30 Minuten und für die Variante 5% Epoxy eine Temperierzeit von 45 Minuten vorzusehen ist, um eine vollständige Reaktion des 2-Komponentensystems zu gewährleisten. Nach Ablauf der Temperierphasen ist keine Veränderung der Verformungsbeständigkeit mehr zu erwarten.

6 Untersuchungen mit einem Epoxydharzsystem mit Anhydridhärter bei Verwendung eines Beschleunigers

6.1 Handmischungen

Analog zu den beiden vorherigen Epoxydharzsystemen begannen auch die Untersuchungen mit einem Epoxydharzsystem mit Anhydridhärter und Beschleuniger in Form von einigen Handmischungen.

Zunächst wurden Marshallprobekörper aus Mischgut mit 25% Epoxy und 1% Beschleuniger bezogen auf die verwendete Harzmenge hergestellt. Hierbei war bereits nach 15 Minuten eine schlechte Verarbeitbarkeit des Mischgutes und eine geringe Raumdichte am Marshallprobekörper ($2,38 \text{ g/cm}^3$) festzustellen.

In einem zweiten Schritt wurde die Beschleunigermenge auf 0,5% reduziert und Marshallprobekörper sofort nach Mischgutherstellung sowie nach 15 und 30 Minuten Temperierung (130°C) verdichtet. Die Verarbeitbarkeit war in allen drei Fällen zufriedenstellend, die Raumdichten der Probekörper nach 0 und 15 Minuten Temperierung mit $2,45 \text{ g/cm}^3$ entsprechend den Erwartungen, nach 30 Minuten jedoch bereits deutlich geringer ($2,40 \text{ g/cm}^3$).

Des weiteren wurden auch Handmischungen mit 15% Epoxy und 0,5% Beschleuniger durchgeführt und daraus ebenfalls nach 0, 15 und 30 Minuten Temperierung bei 130°C Marshallprobekörper hergestellt. Im Ergebnis zeigte sich erst nach 30 Minuten eine leichte Versteifung des Mischgutes und für alle drei Fälle eine einheitliche Raumdichte der Probekörper von $2,45 \text{ g/cm}^3$.

Zusammenfassend konnte im Zuge der durchgeführten Handmischungen festgestellt werden, dass die zur Verfügung stehende Verarbeitungszeit bei einem Epoxy-Gehalt von 15% bis zu 30 Minuten beträgt, bei 25% Epoxy jedoch höchstens 15 Minuten.

Darüber hinaus war im Vergleich zum Epoxy Asphalt ohne Beschleuniger eine deutlich größere Dampfungwicklung festzustellen.

6.2 Mischgutherstellung im Labormischer

Analog zum Vorgehen bei der Variante ohne Beschleuniger wurde auch hier im Anschluss an die durchgeführten Handmischungen eine Mischgutherstellung im Labormischer vorgenommen sowie unter Berücksichtigung der festgestellten Herstellbedingungen einige Probekörper angefertigt.

Um festzustellen, ob auch bei der Verwendung eines Beschleunigers der Zeitpunkt der Probekörperherstellung bzw. die Dauer einer Temperierung einen Einfluss auf die Verformungsbeständigkeit des Asphaltes hat, erfolgte die WSV-Plattenherstellung ebenfalls sofort nach der Mischgutherstellung sowie nach einer Temperierphase von 15 und 30 Minuten (Varianten 5% und 15% Epoxy) bzw. nur nach 15 Minuten (Variante 25% Epoxy), da hier keine längere Verarbeitungszeit gegeben war (vgl. Abschnitt 6.1).

Anschließend erfolgte wie bereits zuvor eine Prüfung des Verformungswiderstandes mit Hilfe des Spurbildungsversuches entsprechend Anhang 1. Die Ergebnisse der Spurbildungsversuche können den nachfolgenden Abbildungen entnommen werden.

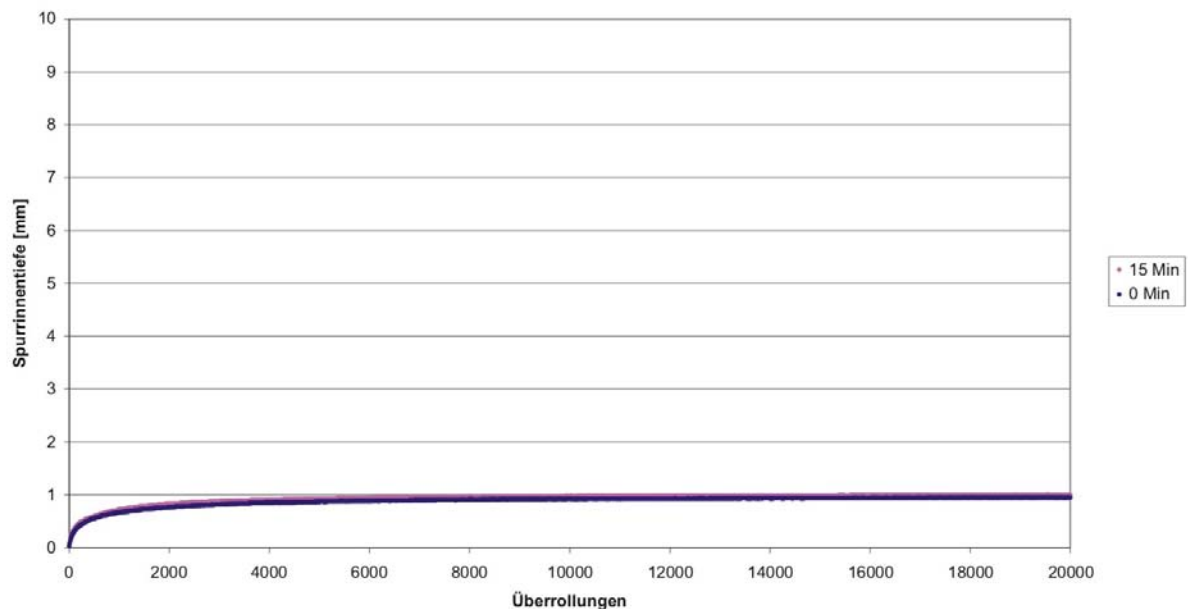


Abbildung 24: Spurrinnentiefe bei 25% Epoxy mit Beschleuniger in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probekörperherstellung

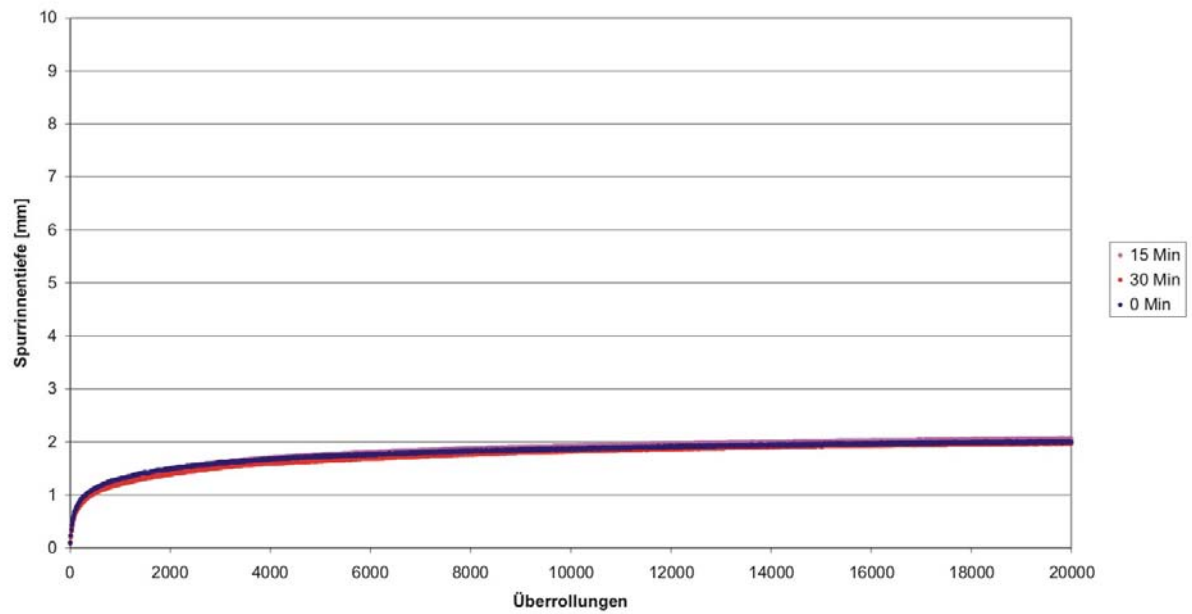


Abbildung 25: Spurrinnentiefe bei 15% Epoxy mit Beschleuniger in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probekörperherstellung

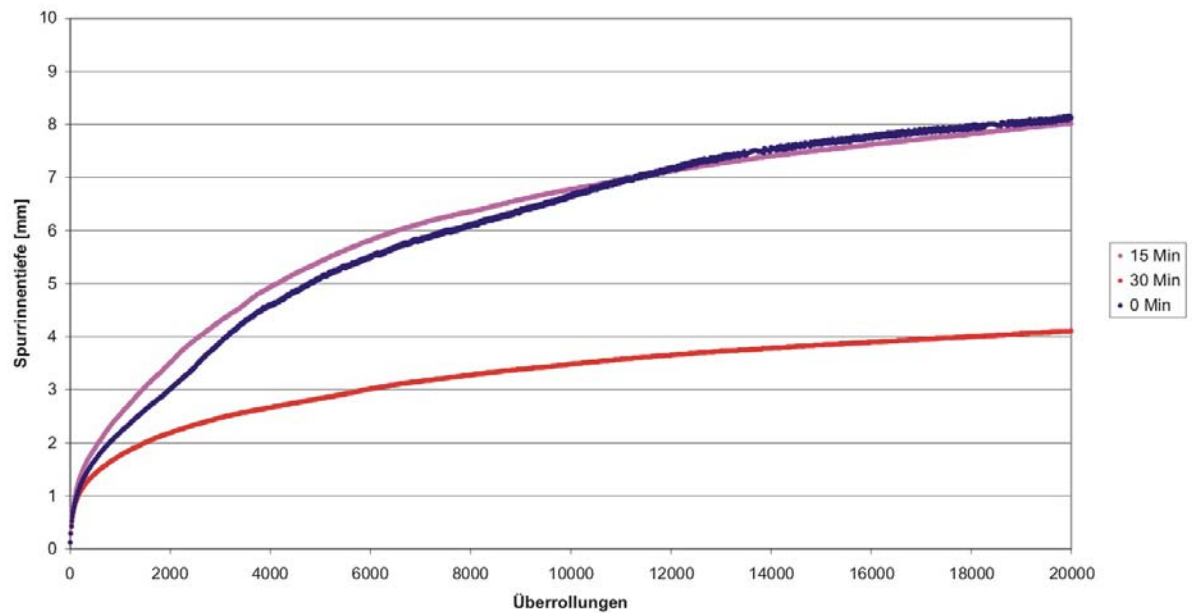


Abbildung 26: Spurrinnentiefe bei 5% Epoxy mit Beschleuniger in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probekörperherstellung

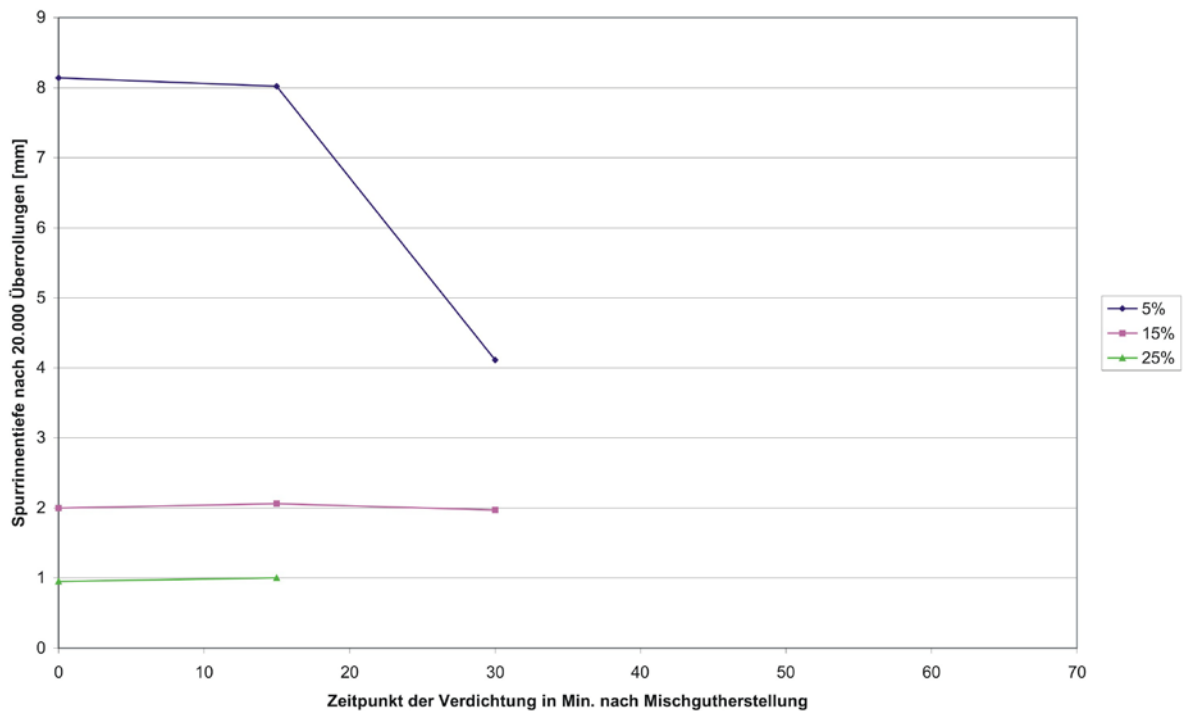


Abbildung 27: Spurrinnentiefe nach 20.000 Überrollungen in Abhängigkeit vom Verdichtungszeitpunkt mit Beschleuniger

Die Ergebnisse der Spurbildungsversuche zeigen deutlich, dass bei der Verwendung eines Beschleunigers für die Varianten mit 15% und 25% Epoxy keine Temperierphase notwendig ist, da bei allen Platten der jeweiligen Variante die Spurrinnentiefe nach 20.000 Überrollungen auf dem gleichen Niveau liegt. Somit könnten in diesem Fall die Probekörper unmittelbar nach der Mischgutherstellung verdichtet werden, da der Beschleuniger für ein unmittelbares Reagieren der beiden Komponenten Harz und Härter sorgt.

Für die Variante mit 5% Epoxy ist jedoch auch bei der Verwendung eines Beschleunigers eine Temperierphase von 30 Minuten erforderlich. Die beiden großen Spurrinnentiefen von ca. acht Millimeter erschienen auf Grund der Ergebnisse der Varianten 25% und 15% zunächst nicht plausibel, wurden jedoch im Zuge einer Wiederholungsprüfung bestätigt. Erst bei der dritten Platte, dessen Mischgut für 30 Minuten bei 130°C temperiert wurde, konnte eine Spurrinnentiefe von ca. vier Millimetern nach 20.000 Überrollungen gemessen werden.

7 Vergleichende Betrachtung der unterschiedlichen Epoxydharzsysteme

Nach Abschluss der Grundlagenuntersuchungen mit unterschiedlichen Epoxydharzsystemen wird eine vergleichende Betrachtung der untersuchten Epoxydharzsysteme vorgenommen. Hierbei gilt es, die gewonnenen Erkenntnisse gegenüberzustellen und zu bewerten. Im Einzelnen können diese in

- Verarbeitbarkeit und Verarbeitungszeit
- Besonderheiten bei der Mischgut- und Probekörperherstellung
- Mechanische Eigenschaften

zusammengefasst werden.

Als Ergebnis der Bewertung soll anschließend ein Epoxydharzsystem für die nachfolgenden Hauptuntersuchungen ausgewählt werden.

Die zu Beginn durchgeführten Handmischungen mit einem Epoxydharzsystem mit Polyaminhärter zeigten keine Auffälligkeiten hinsichtlich der Mischbarkeit und der Verdichtung des Asphaltmischgutes. Die zusätzlich ermittelte Verformungsbeständigkeit ließ darüber hinaus auf eine hohe Standfestigkeit des Epoxy Asphaltes mit Polyaminhärter schließen.

Die Mischgutherstellung im Labormischer offenbarte jedoch eine deutlich zu schnelle Reaktionszeit des Systems, die sich sowohl messtechnisch in den Raumdichten der Probekörper als auch optisch bereits durch eine Zunahme der Steifigkeit des Mischgutes beim Einfüllen in die Probekörperformen zeigte.

Nach Abschluss der Untersuchungen mit einem Epoxydharzsystem mit Polyaminhärter war daher festzustellen, dass dieses System bereits für eine Mischgutherstellung im Laboratorium nicht geeignet ist. Folglich wird diese erste Möglichkeit aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse verworfen und im Folgenden auch nicht weiter betrachtet.

Für das Epoxydharzsystem mit Anhydridhärter konnte im Zuge der durchgeführten Handmischungen eine Verarbeitungstemperatur von 130°C sowohl ohne als auch mit Beschleuniger als geeignet identifiziert werden. Hinsichtlich der bei dieser Temperatur zur Verfügung stehenden Verarbeitungszeit erwies sich die Verwendung eines Beschleunigers als nachteilig,

da hier maximal nur 15 Minuten (25% Epoxy) bzw. 30 Minuten (15% und 5% Epoxy) zur Probekörperherstellung verblieben. Bei der Variante ohne Beschleuniger hingegen betrug die verfügbare Verarbeitungszeit mindestens 30 Minuten, jedoch auch höchstens 45 bis 60 Minuten.

Als Besonderheit bei der Mischgut- und Probekörperherstellung des Epoxy Asphaltes ohne Beschleuniger zeigten die bis zu diesem Zeitpunkt abgeschlossenen Untersuchungen, dass eine 30minütige Temperierphase des fertigen Mischgutes bei 130°C zwingend erforderlich ist, da ansonsten die Reaktion des 2-Komponentensystems nicht vollständig stattgefunden hat. Bei Einsatz eines Beschleunigers war festzustellen, dass für die Varianten mit 15% und 25% Epoxy keine Temperierung des Mischgutes notwendig ist und die Probekörper unmittelbar nach Beendigung des Mischvorgangs verdichtet werden können. Bei der Variante mit 5% Epoxy stellte sich heraus, dass trotz der Zugabe des Beschleunigers auf eine Temperierung nicht verzichtet werden kann.

Die Emissionen in Form von Rauch- und Dampfentwicklungen während der Herstellung und Verarbeitung des Mischgutes waren bei der Verwendung eines Beschleuniger wesentlich höher.

Als weiteres Kriterium für die Bewertung der unterschiedlichen Epoxydharzsysteme werden die im Zuge der Grundlagenuntersuchungen geprüften mechanischen Eigenschaften der Probekörper aus Epoxy Asphalt herangezogen. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde zusätzlich eine Referenzvariante geprüft und anschließend den Ergebnissen der Epoxy-Varianten gegenübergestellt. Das Bindemittel im Referenzmischgut war ein Straßenbaubitumen 50/70 und die Zusammensetzung entsprach der festgelegten Eignungsprüfung gemäß Abschnitt 3.3. Die Epoxy-Varianten unterschieden sich folglich von der Referenzvariante lediglich im Vorhandensein bzw. nicht Vorhandensein des Epoxydharzes.

In einem ersten Schritt wurden die Spurrinnentiefen der einzelnen Varianten nach 20.000 Überrollungen miteinander verglichen. Sie sind in Abbildung 28 grafisch dargestellt.

In einem zweiten Schritt wurden die im Zuge der Mischgutherstellung der einzelnen Varianten ohnehin hergestellten Marshall-Probekörper einer Spaltzugprüfung gemäß Anhang 1 unterzogen. Hierbei wurde auf eine Wasserlagerung einiger Probekörper verzichtet und nur die Zugfestigkeit in trockenem Zustand geprüft. Die Ergebnisse können der Abbildung 29 entnommen werden.

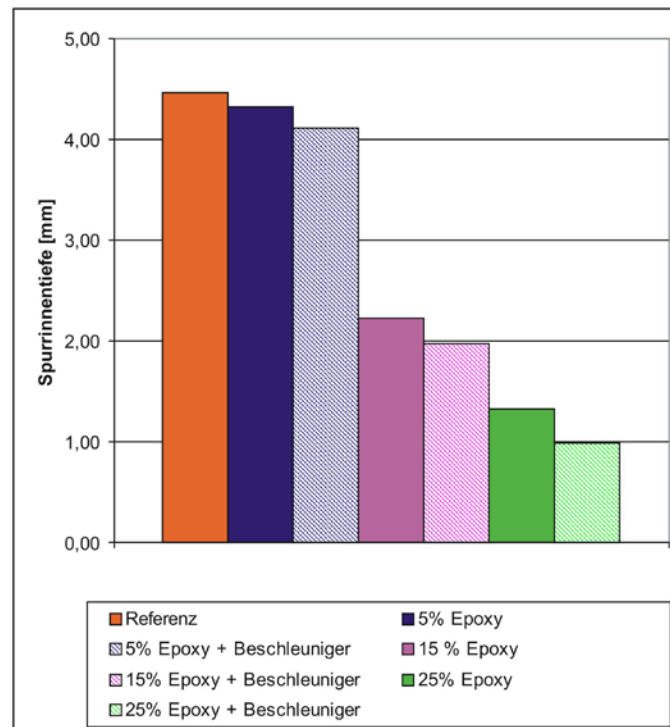


Abbildung 28: Vergleich der Spurrinnentiefe der untersuchten Varianten nach 20.000 Überrollungen

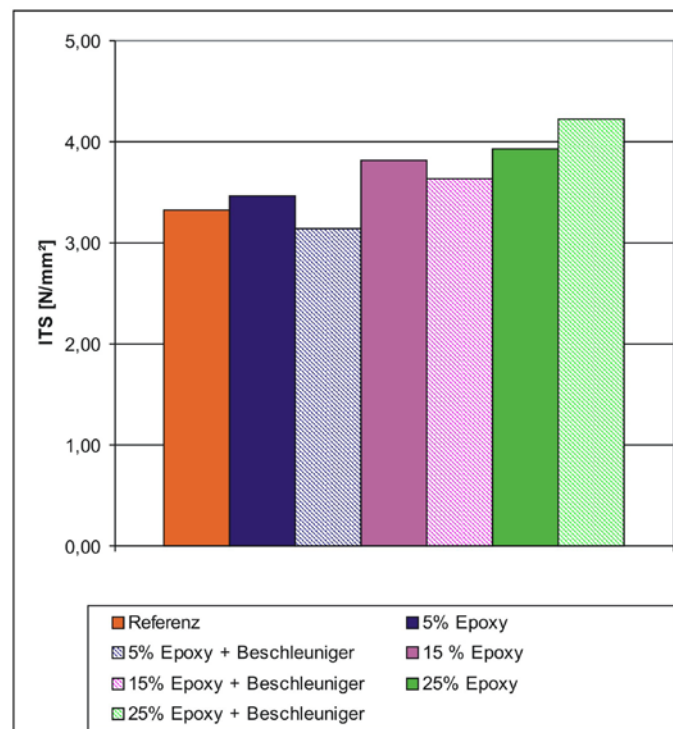


Abbildung 29: Vergleich der Spaltzugfestigkeiten der untersuchten Varianten

Betrachtet man die ermittelten Spurrinnentiefen der untersuchten Varianten, so fällt auf, dass die Asphaltplatten des Epoxydharzsystems mit Beschleuniger eine geringere Spurrinnentiefe besitzen als diejenigen ohne Beschleuniger, allerdings nur geringfügig um ca. 0,2 bis 0,3 mm. Die Differenz der Referenzvariante zu der mit 5% Epoxy ist mit 0,2 bis 0,4 mm nur unwesentlich. Erst von 5% auf 15% Epoxy ist ein größerer Sprung um ca. zwei Millimeter festzustellen und von 15% auf 25% Epoxy konnte die Spurrinnentiefe nochmals um einen Millimeter reduziert werden.

Die Spaltzugfestigkeiten unterscheiden sich hinsichtlich einer Verwendung eines Beschleunigers nur kaum. Die Unterschiede sind im Rahmen der erzielbaren Prüfgenaugkeit als vernachlässigbar zu bezeichnen. Die Referenzvariante und die Variante 5% Epoxy besitzen im Mittel die gleiche Zugfestigkeit, bei der Variante mit Beschleuniger ist diese sogar um 0,2 N/mm² geringer. Insgesamt nimmt die Zugfestigkeit von der Variante 5% Epoxy bis hin zur Variante 25% konstant um etwa 0,4 N/mm² zu.

Da die zur Verfügung stehende Verarbeitungszeit bei der Verwendung eines Beschleunigers deutlich kürzer ist und die Unterschiede bei den mechanischen Eigenschaften nur äußerst gering sind, wird der Einsatz eines Beschleunigers hier nicht weiter verfolgt. Zudem sprechen die erhöhten Emissionen ebenfalls gegen ein Epoxydharzsystem mit Beschleuniger.

Auf Grund der nur äußerst geringen Unterschiede bei den mechanischen Eigenschaften der 5% Variante im Vergleich zur Referenzvariante wird diese im Zuge nachfolgender Untersuchungen nicht weiter betrachtet.

Bis zu diesem Zeitpunkt der Untersuchungen war es ausreichend, nur mit einem Straßenbaubitumen 50/70 als Referenzvariante zu arbeiten, um lediglich den Einfluss des Epoxydharzes auf die Eigenschaften des Asphaltes zu identifizieren. Da jedoch in den Fällen von hochbelasteten Straßen mit Deckschichten aus Splittmastixasphalt in der Regel ein Polymermodifiziertes Bitumen verwendet wird, ist es notwendig ebenfalls eine Referenzvariante mit PmB im weiteren Vorgehen zu betrachten.

Somit stehen für die anschließenden Hauptuntersuchungen folgende vier Varianten fest:

1. Referenz 50/70
2. Referenz PmB
3. 15% Epoxy (ohne Beschleuniger)
4. 25% Epoxy (ohne Beschleuniger)

II.





Hauptuntersuchungen

mit einem ausgewählten Epoxydharzsystem

8 Hauptuntersuchungen an ausgewählten Varianten

Die in der Phase I gewonnenen Erkenntnisse der Grundlagenuntersuchungen stellten die Basis für die Hauptuntersuchungen in der Phase II dar. Hier wurden einige Bindemittel- und Mischguteigenschaften der Epoxy Varianten mit Hilfe von standardisierten Prüfverfahren ermittelt und denen der Referenzvarianten gegenübergestellt. Dabei galt es die in der Phase I festgelegten Randbedingungen wie die 30minütige Temperierung des Mischgutes mit Epoxydharz einzuhalten.

Die folgende farbliche Zuordnung der einzelnen Varianten gilt einheitlich für alle erstellten Diagramme der Hauptuntersuchungen:

-  Referenz 50/70
-  Referenz PmB
-  15% Epoxy
-  25% Epoxy

8.1 Bindemitteluntersuchungen

Da vor der Probekörperherstellung aus Epoxy Asphalt eine Temperierphase von 30 Minuten bei 130°C notwendig war, wurde vorausgesetzt, dass dies bei den Probekörpern für die Bindemitteluntersuchungen gleichermaßen gilt. Daher erfolgte vor dem Einfüllen des Bitumen-Epoxy-Gemisches in die Probekörperformen eine Temperierung des Gemisches für 30 Minuten bei 130°C.

8.1.1 Erweichungspunkt Ring und Kugel

Die Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel der vier Varianten erfolgte gemäß Anhang 1.

Die Prüfergebnisse sind in Tabelle 8 und Abbildung 30 dargestellt.

Tabelle 8: Erweichungspunkte Ring und Kugel in °C

	Referenz 50/70	Referenz PmB	15% Epoxy	25% Epoxy
Probe 1	51,3	60,4	43,6	43,7
Probe 2	51,5	60,9	43,7	43,5
Mittelwert	51,4	60,7	43,7	43,6

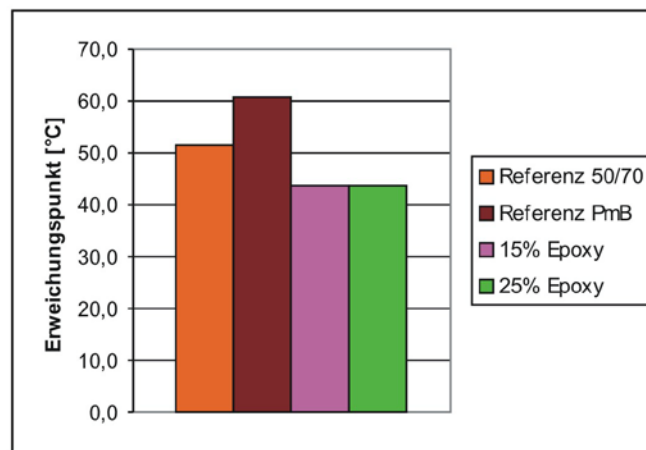


Abbildung 30: Erweichungspunkte Ring und Kugel

Die ermittelten Erweichungspunkte der beiden Referenzvarianten bestätigen in etwa die Angaben der Tabelle 2. Die Erweichungspunkte der beiden Epoxy Varianten liegen trotz des unterschiedlichen Gehaltes an Epoxydharz auf gleichem Niveau, jedoch um etwa acht Grad unter dem Erweichungspunkt des Ausgangsbitumens 50/70.

Somit ist festzustellen, dass durch die Zugabe des Epoxydharzes die Viskosität des Bitumens deutlich herabgesetzt wird. Die Menge an Epoxydharz im Bitumen scheint hierbei nicht von Bedeutung zu sein.

8.1.2 Dynamisches Scherrheometer

Die Untersuchung der vier Varianten mit dem Dynamischen Scherrheometer erfolgte gemäß Anhang 1.

Der komplexe Schubmodul sowie der Phasenwinkel der vier Varianten sind in den Abbildungen 31 und 32 dargestellt.

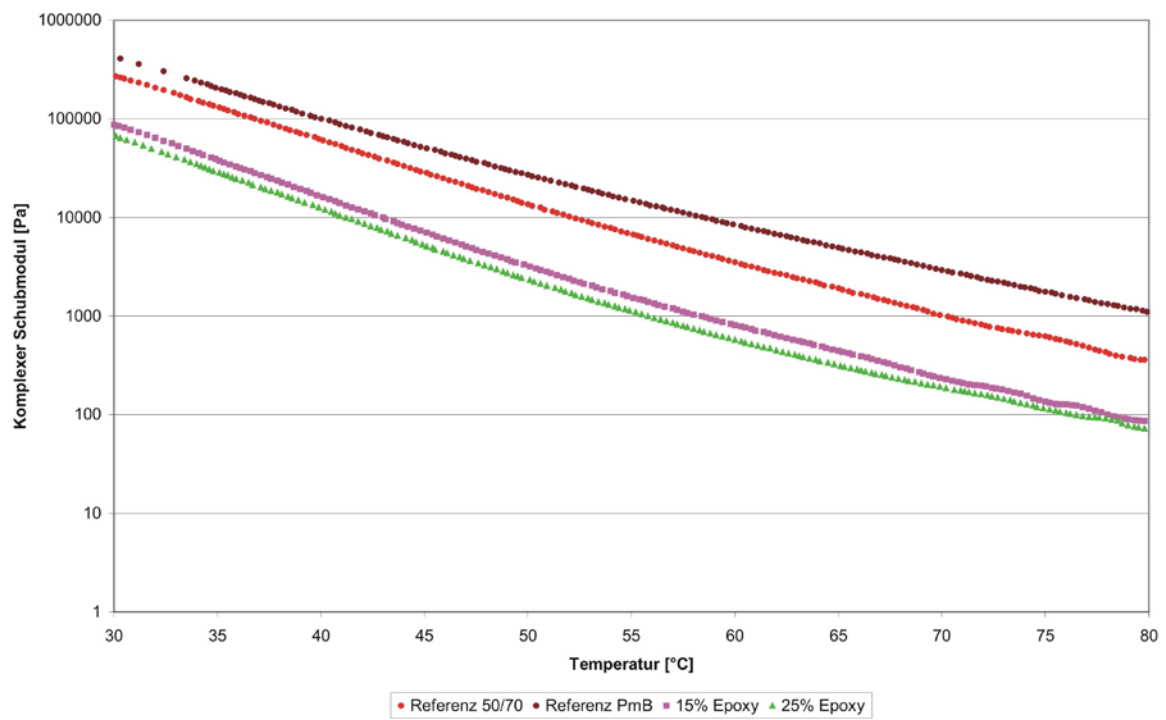


Abbildung 31: Komplexer Schubmodul der geprüften Bindemittel

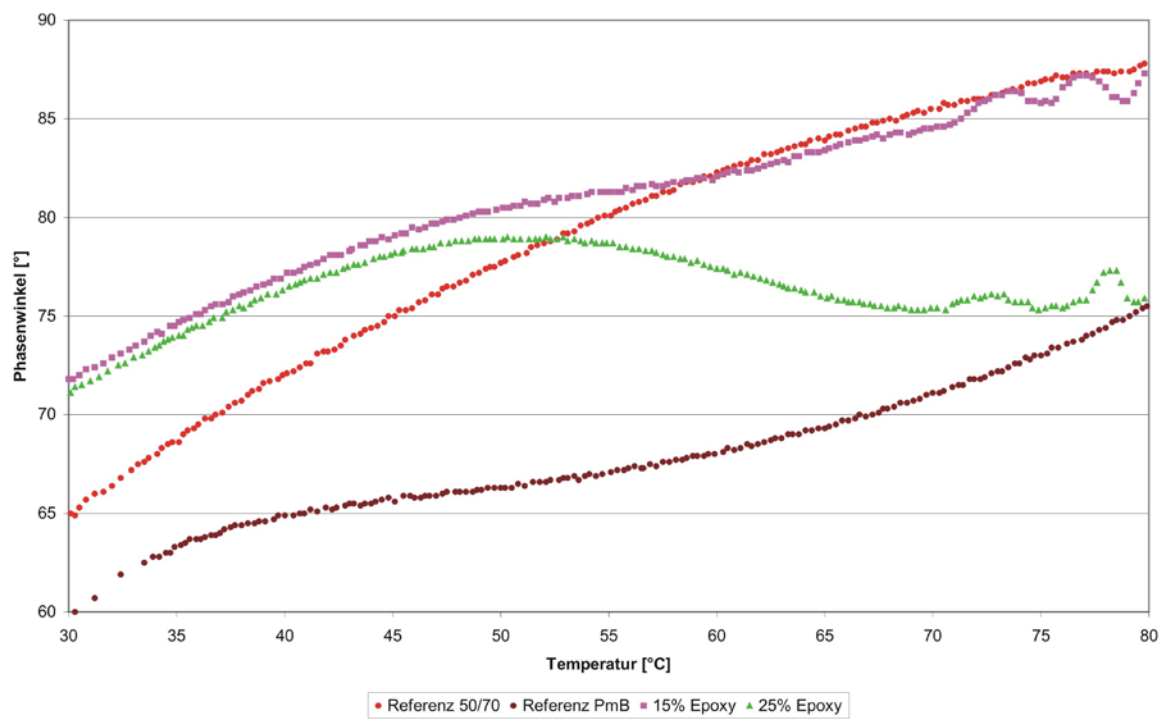


Abbildung 32: Phasenwinkel der geprüften Bindemittel

Die Messung des komplexen Schubmoduls der untersuchten Bindemittel liefert über den gesamten Temperaturbereich einen nahezu parallelen Verlauf für alle vier Varianten, der sich lediglich hinsichtlich des Niveaus unterscheidet. Die beiden Epoxy Varianten, von denen die 15% Variante nur unwesentlich über der 25% Variante liegt, verlaufen auf einem deutlich geringeren Niveau als die beiden Referenzvarianten.

Mit Hilfe des komplexen Schubmoduls können Aussagen über die Viskosität eines Bindemittels getroffen werden. Hierbei gilt: je geringer der Schubmodul, desto geringer ist auch die Viskosität des Bindemittels. Aus den hier vorliegenden Ergebnissen des komplexen Schubmoduls kann somit abgeleitet werden, dass die Zugabe von Epoxydharz zum Bitumen eine Verringerung der Viskosität bewirkt.

Die Messung des Phasenwinkels liefert Aussagen zu den elastischen Eigenschaften eines Bindemittels. Grundsätzlich gilt der Zusammenhang: je kleiner der Phasenwinkel bei einer definierten Temperatur, desto günstiger ist das elastische Verhalten bei dieser Temperatur und damit die Fähigkeit sich nach einer aufgetragenen Belastung wieder zurückzuformen.

Die Phasenwinkelmessungen an den beiden Referenzvarianten zeigen erwartungsgemäß die Unterschiede hinsichtlich der Modifizierung des PmB durch die Polymere. Der Phasenwinkel des Straßenbaubitumens tendiert bei hohen Temperaturen gegen 90° ; dies entspricht einem nahezu flüssigen Zustand des Bindemittels. Dahingegen besitzt das PmB bei einer Temperatur von 80°C nur einen Phasenwinkel von 75° .

In einem Temperaturbereich zwischen 30 und 60°C zeigt die Variante mit 15% Epoxydharz einen höheren Phasenwinkel als das reine Straßenbaubitumen. Ab 60°C verlaufen beide Kurven in etwa gleich.

Das Bindemittelgemisch mit 25% Epoxy besitzt bis zu einer Temperatur von etwa 50°C einen ähnlichen Phasenwinkel wie die 15% Variante. Innerhalb der folgenden Temperaturerhöhung bis hin zu 70°C fällt er im Gegensatz zur 15%igen Mischung jedoch wieder ab und bleibt anschließend nahezu konstant. Aus diesem Verlauf des Phasenwinkels ist zu schließen, dass ab einer Temperatur von 50°C eine Erhöhung des elastischen Anteils und somit eine Veränderung in der Struktur des Bindemittels stattgefunden haben muss. Die Ausbildung eines solchen Phasenwinkels findet man in ähnlicher Form nur bei hochpolymermodifizierten Bitumen.

8.1.3 Kraftduktilometer

Die Untersuchung der vier Bindemittel mit dem Kraftduktilometer erfolgte gemäß Anhang 1.

Die Ergebnisse der Prüfungen können der Abbildung 33 entnommen werden. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert von zwei Einzelprüfungen je Variante.

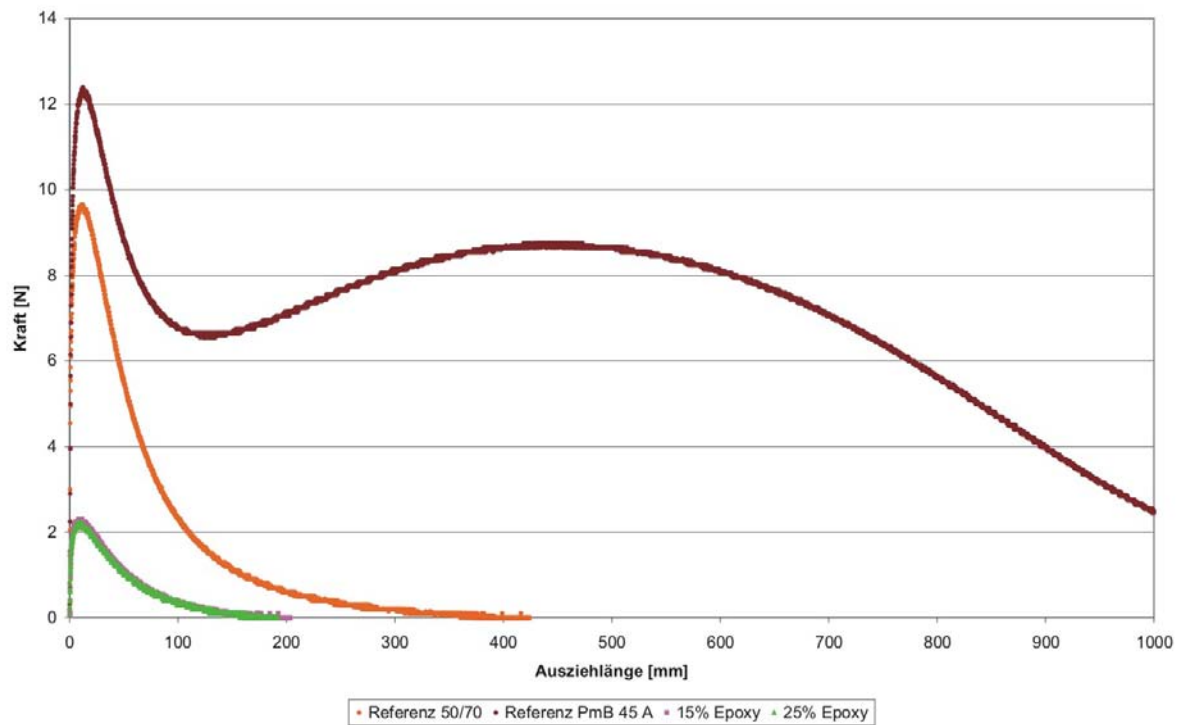


Abbildung 33: Kraftduktilität der geprüften Bindemittel

Die Ergebnisse der Kraftduktilitätsmessung der beiden Referenzvarianten entspricht den Erwartungen. Das PmB 45 A besitzt mit 12,5 N ein größeres Kraftmaximum als das Straßenbaubitumen 50/70 mit 9,5 N und zeigt nach einer Ausziehlänge von etwa 150 mm den für ein polymermodifiziertes Bitumen charakteristischen zweiten Anstieg der Zugkraft. Darüber hinaus ist selbst nach einer Ausziehlänge von 1.000 mm noch eine Kraft von etwa 2,5 N messbar, wohingegen beim 50/70 nach etwa 400 mm die Zugkraft im Bitumenfaden nicht mehr messbar ist.

Die Verläufe der Zugkraft der beiden Epoxy Varianten stimmen sowohl qualitativ als auch quantitativ nahezu überein. Daraus ist abzuleiten, dass die Menge an Epoxydharz keinen Einfluss auf die Duktilität eines solchen Bindemittelgemisches hat.

Die maximale Zugkraft der Epoxy Varianten liegt mit etwas mehr als zwei Newton jedoch deutlich unter den beiden Referenzvarianten und auch die Zugkraft im Bindemittelfaden ist hier bereits nach einer Ausziehlänge von 200 mm nicht mehr messbar. Die im Zuge der Erweichungspunktbestimmung und den DSR-Messungen festgestellte Verringerung der Viskosität ist somit auch bei den Kraftduktilitätsmessungen erkennbar.

8.1.4 Bending Beam Rheometer

Die Untersuchung der vier Bindemittel mit dem Bending Beam Rheometer erfolgte gemäß Anhang 1.

Die Ergebnisse der Prüfungen können der Abbildung 34 entnommen werden. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert von zwei Einzelprüfungen je Variante. Die Verläufe der Einzelwerte sind im Anhang 2 dargestellt.

Die Kälteeigenschaften der beiden Referenzvarianten sind nahezu identisch. Der Verlauf der Durchbiegung des Balkens aus polymermodifiziertem Bitumen liegt lediglich um ca. 0,1 mm unter dem des Straßenbaubitumens 50/70.

Die beiden Epoxy Varianten hingegen zeigen ein deutlich anderes Verhalten im Bending Beam Rheometer. Bei ihnen ist eine wesentlich größere Durchbiegung des Probekörpers messbar, die auf den ersten Blick ein günstigeres Kälteverhalten im Vergleich zu den Referenzvarianten erahnen lässt. Ob dies wirklich der Fall ist oder ob auch hier die niedrigere Viskosität des Bitumen-Epoxy-Gemisches die Ursache ist, muss anhand der Untersuchungen des Tieftemperaturverhaltens am Epoxy Asphalt überprüft werden.

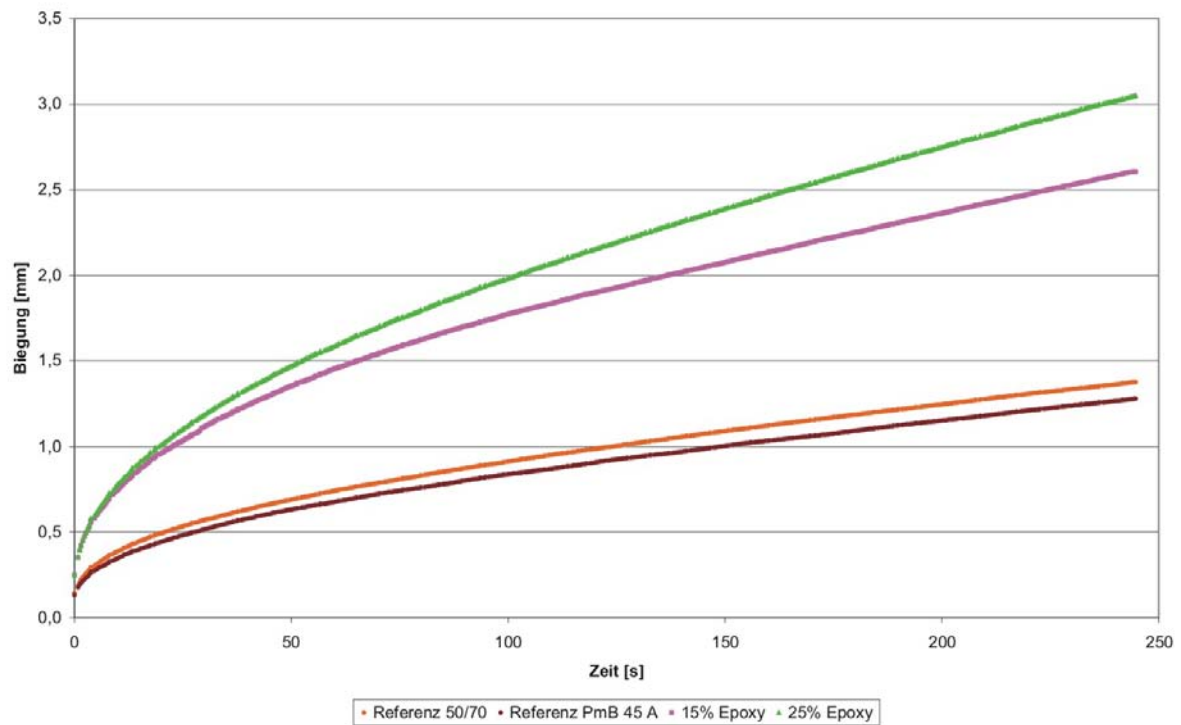


Abbildung 34: Ergebnis der Bindemittelprüfung im Bending Beam Rheometer

8.2 Mischgutuntersuchungen

8.2.1 Verformungsbeständigkeit im Spurbildungsversuch

Die Prüfung der Verformungsbeständigkeit im Spurbildungsversuch erfolgte gemäß Anhang 1.

Die Ergebnisse der Prüfungen können der Abbildung 35 entnommen werden. Dargestellt ist jeweils der Verlauf der Spurrinnenentwicklung als Mittelwert von zwei Einzelprüfungen je Variante. Die Verläufe der Einzelwerte der vier Varianten sind im Anhang 3 dargestellt.

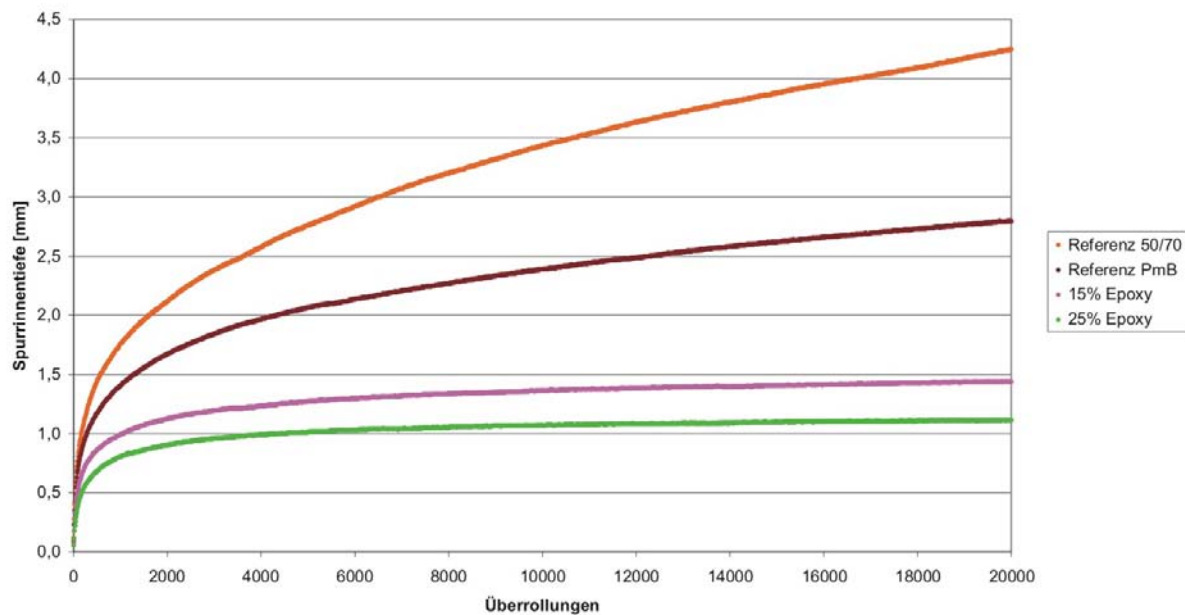


Abbildung 35: Ergebnisse der Spurbildungsversuche der geprüften Varianten

Betrachtet man die Ergebnisse der Spurbildungsversuche, so unterscheiden sich sowohl die Verläufe als auch die gemessenen Spurrinnentiefen nach 20.000 Überrollungen der Referenzvarianten deutlich von den Epoxy Varianten.

Besitzt die Variante Referenz 50/70 nach Beendigung des Versuchs noch eine Spurrinnentiefe von 4,3 mm, so kann diese durch den Einsatz eines PmB 45 bereits auf 2,8 mm reduziert werden. Bei einer Zugabe von 15% Epoxydharz ist eine weitere Verbesserung der Verformungsbeständigkeit festzustellen; hier beträgt die Spurrinnentiefe nur noch 1,4 mm. Bei einem Anteil von 25% Epoxydharz kann sie nochmals bis auf 1,1 mm verringert werden.

Darüber hinaus unterscheiden sich ebenfalls die Verläufe der Spurrinnenentwicklungen über die gesamte Dauer der Überrollungen. Bei den beiden Referenzvarianten nimmt die Spurrinnentiefe bis zum Erreichen der 20.000 Überrollungen stetig zu, lediglich auf einem anderen Niveau. Bei den beiden Epoxy Varianten hingegen tritt innerhalb der ersten 6.000 Überrollungen eine Konsolidierung ein und bleibt anschließend nahezu konstant.

Die ermittelten Ergebnisse zeigen, dass der hergestellte Epoxy Asphalt eine wesentlich verbesserte Spurrinnenresistenz aufweist im Vergleich zu einem konventionellem Asphalt mit Straßenbaubitumen oder mit polymermodifiziertem Bitumen. Ferner ist festzustellen, dass die Zugabe von 25% Epoxy nur eine geringere Verbesserung gegenüber einem Epoxydharzanteil von 15% bewirkt.

8.2.2 Verformungsbeständigkeit im Druckschwellversuch

Die Prüfung der Verformungsbeständigkeit mittels Druckschwellversuch erfolgte gemäß Anhang 1.

Abbildung 36 zeigt die Entwicklung der vertikalen plastischen Verformungen über die Versuchsdauer und Tabelle 9 die Lage der Wendepunkte für jede der geprüften Varianten. Es handelt sich hierbei jeweils um den Mittelwert aus drei Einzelprüfungen. Die Ergebnisse der Einzelprüfungen können dem Anhang 4 entnommen werden.

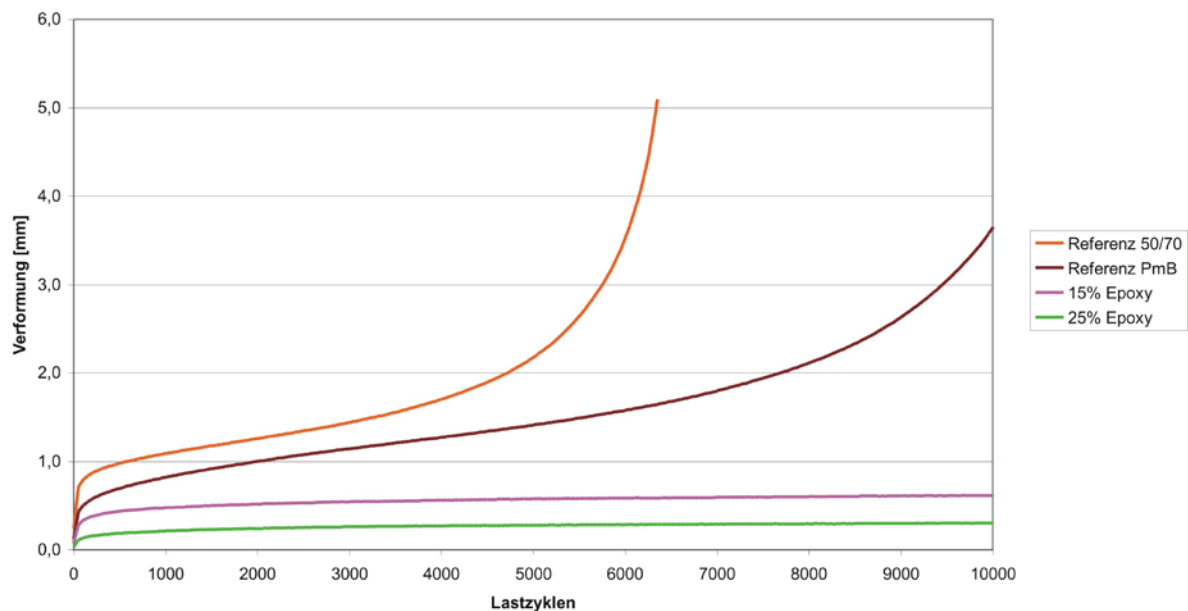


Abbildung 36: Ergebnisse der Druckschwellversuche der geprüften Varianten

Tabelle 9: Wendepunkte der Verformungskurven

Variante	Lage der Wendepunkte	
	Lastwechsel	Verformung [mm]
Referenz 50/70	1.684	1,21
Referenz PmB	3.334	1,19
15% Epoxy	> 10.000	0,62
25% Epoxy	> 10.000	0,30

Die Variante Referenz 50/70 zeigt erwartungsgemäß das ungünstigste Verhalten, da einerseits das gemessene Niveau der Verformungen von allen Varianten am höchsten liegt und sie andererseits als einzige Variante bereits vor Ablauf der vorgesehenen 10.000 Lastwechsel versagt.

Die Referenzvariante mit polymermodifiziertem Bitumen zeichnet sich hingegen durch einen langsameren Anstieg der Verformungen aus und weist nach Beendigung der 10.000 Lastwechsel eine Verformung von etwa 3,7 mm auf. Jedoch deutet der innerhalb der letzten 3.000 Lastwechsel steiler werdende Anstieg der Kurve auf ein bevorstehendes Versagen des Probekörpers hin.

Im Vergleich zu den beiden Referenzvarianten, deren Verformungsbeständigkeiten den Erwartungen entsprechen, besitzen die Varianten aus Epoxy Asphalt ein völlig anderes Verformungsverhalten. Hier stellt sich bereits nach etwa 1.000 bis 1.500 Lastwechseln der endgültige Verformungswert ein und bleibt anschließend über die gesamte verbleibende Versuchsdauer konstant. Lediglich das Niveau ist mit 0,62 mm bei 15% Epoxy etwas höher als mit 0,30 mm bei 25% Epoxy.

Die festgestellten Unterschiede bei der Verformungsbeständigkeit im Druckschwellversuch spiegeln sich ebenfalls in der Lage der Wendepunkte der einzelnen Verformungskurven wieder. Die Variante Referenz 50/70 besitzt bereits nach ca. 1.700 Lastwechseln ihren Wendepunkt, wohingegen bei der Variante Referenz PmB sich der Kurvenverlauf erst nach ca. 3.300 Lastwechseln ändert. Bei den Probekörpern aus Epoxy Asphalt konnte dagegen innerhalb der geprüften 10.000 Lastwechsel kein Wendepunkt festgestellt werden.

Das unterschiedliche Verformungsverhalten lässt sich am Zustand der Probekörper nach Beendigung der Prüfungen (10.000 Lastwechsel) erkennen:

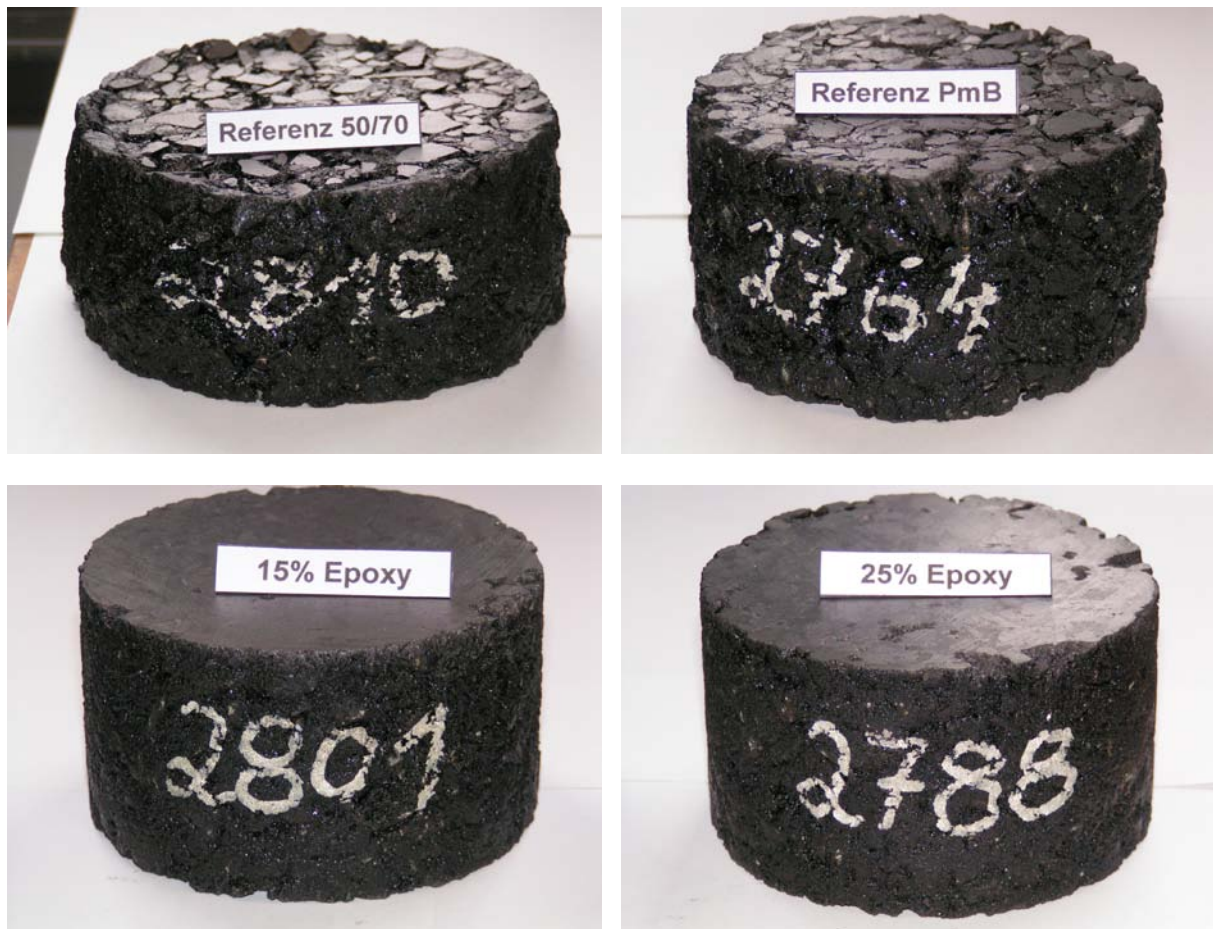


Abbildung 37: Probekörper der vier Varianten nach Beendigung der Druckschwellversuche

Somit lässt sich anhand der Ergebnisse aus den Druckschwellversuchen der Verformungswiderstand der vier Varianten eindeutig bewerten: Die beiden Varianten aus Epoxy Asphalt besitzen einen deutlich größeren Widerstand gegen Verformungen. In beiden Fällen konnte im Verlauf der plastischen Verformungen kein Wendepunkt ermittelt werden.

Die bei 25% Epoxydharz erzielbare Verbesserung der Verformungsbeständigkeit gegenüber einem Anteil von 15% Epoxydharz ist absolut als sehr gering anzusehen.

8.2.3 Haftverhalten am Einzelkorn

Die Ansprache des Haftverhaltens am Einzelkorn erfolgte gemäß Anhang 1.

In der Tabelle 10 sowie in der Abbildung 38 sind die Ergebnisse der Affinitätsprüfung der vier Varianten aufgeführt. Dargestellt ist jeweils der Umhüllungsgrad mit Bitumen als Mittelwert von drei Einzelproben nach einer Rührzeit von sechs und 24 Stunden. Die Einzelwerte der Prüfungen können dem Anhang 5 entnommen werden.

Tabelle 10: Umhüllungsgrade nach der Affinitätsprüfung

Rührzeit [h]	Grad der Umhüllung [%]			
	Referenz 50/70	Referenz PmB	15% Epoxy	25% Epoxy
0	100	100	100	100
6	85	90	95	95
24	45	65	75	75

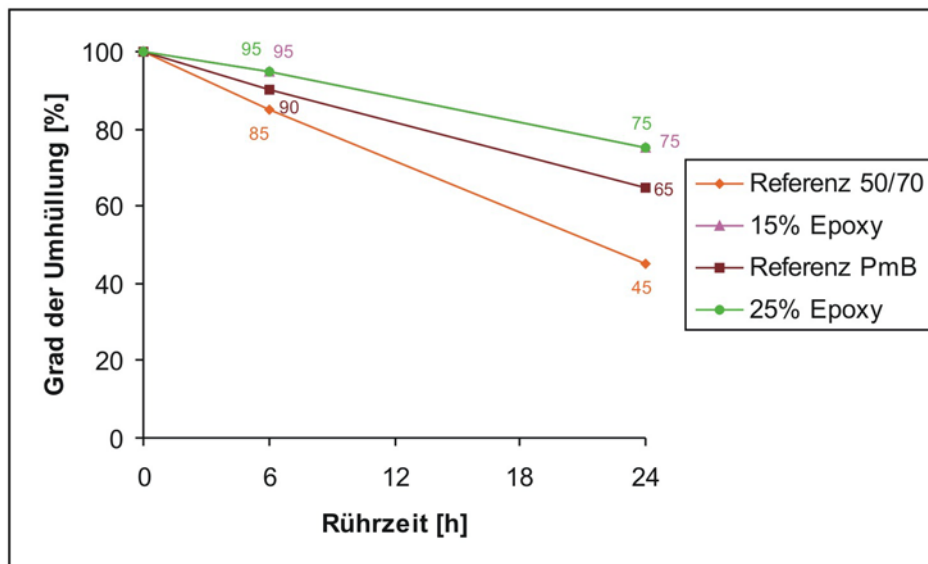


Abbildung 38: Grafische Darstellung der Umhüllungsgrade

Die Umhüllungsgrade nach einer Rührzeit von sechs Stunden lassen noch keine qualifizierte Differenzierung der vier Varianten zu, da die ermittelten Werte sehr dicht beieinander liegen. Die untere Grenze wird mit 85% durch die Variante Referenz 50/70 und die obere Grenze mit 95% durch die beiden Epoxy Varianten gebildet.

Nach einer Rührzeit von 24 Stunden hingegen ist eine Beurteilung des Haftverhaltens möglich. Den ungünstigsten Wert besitzt auch hier die Variante Referenz 50/70 mit einem Umhüllungsgrad von 45%. Deutlich besser zeigt sich die Variante Referenz PmB, bei der nach Beendigung des Versuchs ein Umhüllungsgrad von 65% ermittelt wurde. Nochmals um 10% über der Variante Referenz PmB liegen die beiden Epoxy Varianten, die nach 24 Stunden Rolldauer immer noch zu 75% mit einem Bindemittelfilm umhüllt sind.

Aus den oben dargestellten Ergebnissen geht ebenfalls hervor, dass die Menge an Epoxydharz, die dem Bitumen zugegeben wird, keinen Einfluss auf das Haftverhalten am Einzelkorn hat. Beide Varianten, sowohl 15% als auch 25% Epoxy, zeigten im Rolling Bottle Test gleiche Ergebnisse.

Insgesamt lassen die aus den Rolling Bottle Tests gewonnen Erkenntnisse die Schlussfolgerung zu, dass durch die Zugabe von Epoxydharz das Haftvermögen am Einzelkorn wesentlich verbessert werden kann.

8.2.4 Haftverhalten im Mischgut

Die Prüfung des Haftverhaltens im Mischgut erfolgte mittels Spaltzugversuch gemäß Anhang 1.

In Tabelle 11 sind die Ergebnisse der Spaltzugversuche an Marshall-Probekörpern der vier Varianten aufgeführt. Geprüft wurden jeweils drei Probekörper im trockenen Zustand und drei Probekörper nach Wasserlagerung. Als Bewertungskriterium für das Haftverhalten des jeweiligen Mischgutes wird das ebenfalls in der Tabelle 11 dargestellte Verhältnis der indirekten Zugfestigkeiten ITSr herangezogen.

Tabelle 11: Ergebnisse der Spaltzugprüfungen

Variante	Probekörper-Nr.		ITS [N/mm ²]		ITSR [%]
	nass	trocken	nass	trocken	
Referenz 50/70	2672	2673	3,012	3,442	87,5
	2674	2675	2,934	3,421	85,8
	2676	2677	2,801	3,363	83,3
	Mittelwert		2,916	3,409	85,5
Referenz PmB	2729	2725	3,610	3,961	91,1
	2726	2730	3,735	4,039	92,5
	2727	2728	3,915	4,160	94,1
	Mittelwert		3,753	4,053	92,6
15% Epoxy	2733	2734	3,479	3,777	92,1
	2735	2737	3,320	3,546	93,6
	2738	2736	2,982	3,061	97,4
	Mittelwert		3,260	3,461	94,4
25% Epoxy	2748	2749	3,670	3,708	99,0
	2750	2751	4,027	4,077	98,8
	2753	2752	3,559	3,487	102,1
	Mittelwert		3,752	3,757	99,9

Die Variante Referenz 50/70 weist mit einem ITSR-Wert von 85,5% die ungünstigsten Hafteigenschaften der vier geprüften Varianten auf. Dies bedeutet, dass die Zugfestigkeit der nassen Probekörper um 15% schlechter als die der trockenen Probekörper ausfällt.

An den Probekörpern der Variante Referenz PmB konnten insgesamt die höchsten Zugfestigkeiten gemessen werden. Das Verhältnis von nass zu trocken liegt mit 92,6% jedoch noch unter der Variante 15% Epoxy, bei der die Zugfestigkeiten der nassen nur um 5,6% schlechter im Vergleich zu denen der trockenen Probekörper sind.

Die Variante 25% Epoxy besitzt mit 99,9% den besten ITSR-Wert aller Varianten. Das Haftverhalten von Epoxy Asphalt mit einem Epoxydharzanteil von 25% sind somit äußerst positiv zu bewerten, da die Zugfestigkeiten der Probekörper nach Wasserlagerung nahezu identisch mit denen der trockenen Probekörper sind.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Verformungskurven aus den Spaltzugversuchen für alle vier geprüften Varianten nebeneinander gestellt. Jedes Diagramm beinhaltet den Verlauf des nassen (blaue Kurve) und des trockenen (rote Kurve) Probekörpers als Mittelwert der drei Einzelverläufe.

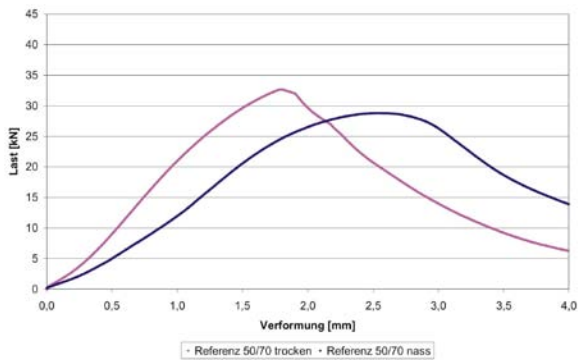


Abbildung 39: Spaltzugversuche bei Referenz 50/70

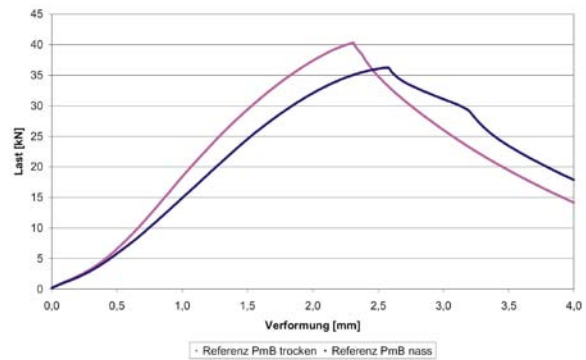


Abbildung 40: Spaltzugversuche bei Referenz PmB

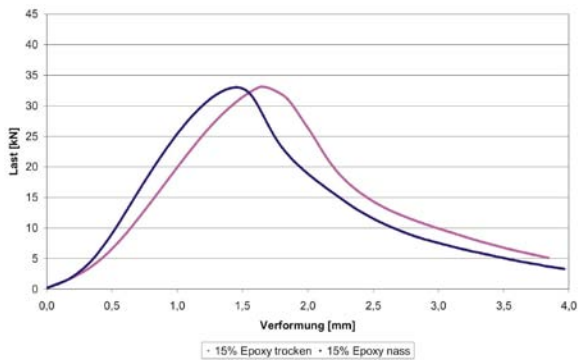


Abbildung 41: Spaltzugversuche bei 15% Epoxy

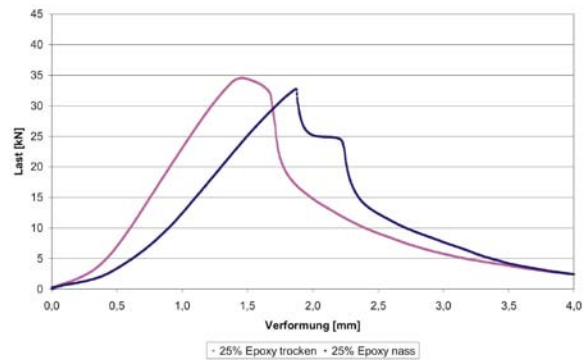


Abbildung 42: Spaltzugversuche bei 25% Epoxy

Bewertet man die Zugfestigkeit, das heißt die Ergebnisse der im trockenen Zustand geprüften Probekörper, so ist diese bei der Variante Referenz PmB am größten (ca. 4,1 N/mm²). Bei der Variante 25% Epoxy konnten darauf folgend etwa 3,8 N/mm² gemessen werden. Zwischen den Varianten Referenz 50/70 (3,4 N/mm²) und 15% Epoxy (3,5 N/mm²) konnten keine unterschiedlichen Zugfestigkeiten ermittelt werden.

Folglich ist festzustellen, dass eine Zugabe von Epoxydharz die Zugfestigkeit des Asphaltes nur geringfügig verbessert. Diese Erkenntnis deutete sich bereits im Rahmen der in der Phase I durchgeführten Spaltzugversuche an (vgl. Abschnitt 7). Die dort ermittelten Ergebnisse konnten somit bestätigt werden.

Eine vergleichende Betrachtung der Verformungskurven der beiden Referenzvarianten mit den Epoxy Varianten führt zu dem Ergebnis, dass die Steigung der Referenzkurven deutlich

geringer ausfällt als bei den Epoxy Varianten. Der Bruch der Probekörper aus Epoxy Asphalt tritt bereits nach einer Verformung von ca. 1,5 mm auf, wohingegen die Probekörper der Varianten Referenz 50/70 und Referenz PmB erst nach einer sich einstellenden Verformung von 2,0 bis 2,5 mm versagen.

Anhand der Verformungskurven aus den Spaltzugversuchen kann somit auch auf ein sprödes Materialverhalten von Epoxy Asphalt geschlossen werden.

8.2.5 Schichtenverbund

Die Prüfung des Schichtenverbunds zwischen Asphaltbinder- und Asphaltdeckschicht erfolgte mittels Scherversuch nach Leutner gemäß Anhang 1.

Hierzu wurden aus einem Plattenpaket bestehend aus 8,0 cm Asphaltbinder und 4,0 cm Asphaltdeckschicht jeweils zwei Bohrkerne mit einem Durchmesser von 150 mm entnommen (vgl. Abb. 43).



Abbildung 43: Plattenpaket und daraus entnommene Bohrkerne

Pro Variante existierten zwei Plattenpakete und somit lieferte die Prüfung des Schichtenverbundes vier Einzelergebnisse.

Die Ergebnisse der Scherversuche (maximale Scherkraft und Scherweg) sind in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 12: Ergebnisse der Scherversuche nach Leutner

Variante		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
Referenz 50/70	Bohrkern 1	25,1	2,5
	Bohrkern 2	30,8	3,0
	Bohrkern 3	28,8	3,4
	Bohrkern 4	24,1	2,9
	Mittelwert	27,2	2,9
Referenz PmB	Bohrkern 1	32,1	2,8
	Bohrkern 2	38,5	2,8
	Bohrkern 3	40,5	3,5
	Bohrkern 4	35,3	3,2
	Mittelwert	36,6	3,1
15% Epoxy	Bohrkern 1	28,2	1,5
	Bohrkern 2	33,1	2,0
	Bohrkern 3	31,4	2,2
	Bohrkern 4	30,3	1,7
	Mittelwert	30,7	1,9
25% Epoxy	Bohrkern 1	31,4	2,2
	Bohrkern 2	(44,5)	(2,5)
	Bohrkern 3	32,8	1,9
	Bohrkern 4	33,1	1,8
	Mittelwert	32,4	2,0

Bei den Bohrkernen der Variante Referenz 50/70 ergab die Prüfung des Schichtenverbundes mit einer mittleren Scherkraft von etwa 27 kN das ungünstigste Ergebnis aller vier Varianten. An zweiter Stelle liegt die Variante mit 15% Epoxy, bei der im Mittel eine Scherkraft von 30,7 kN gemessen wurde.

Den besten Schichtenverbund weist die Variante Referenz PmB mit einer mittleren Scherkraft von 36,6 kN auf, gefolgt von der Variante 25% Epoxy mit einer mittleren Scherkraft von 32,4 kN. Diese relativ geringe Differenz ist insofern positiv zu bewerten, da sich die Einbau- und Verdichtungstemperaturen der beiden Varianten merklich unterscheiden. Bei dem Mischgut mit polymermodifiziertem Bitumen lag diese bei 145°C, bei der Variante mit 25%

Epoxydharz bei 130°C und somit hinsichtlich einer Verklebung mit der Unterlage vergleichsweise ungünstiger. Gleiches gilt für die Variante mit 15% Epoxy.

Betrachtet man den während der Prüfung aufgezeichneten Scherweg der vier Varianten, so fällt auf, dass dieser im Mittel bei den Varianten Referenz 50/70 und Referenz PmB um einen Millimeter länger ist als bei den beiden Epoxy Varianten. Diese Feststellung weist, wie auch schon die gemessenen Verformungen beim Spaltzugversuch, auf ein spröderes Materialverhalten auch an den Grenzflächen hin.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Verwendung von Epoxydharz keinen negativen Einfluss auf den Schichtenverbund der Asphaltdeckschicht mit der Unterlage hat. Unter Berücksichtigung der geringeren Einbau- und Verdichtungstemperaturen scheint sich die Klebkraft des Zweikomponentensystems vielmehr positiv auf den Schichtenverbund auszuwirken.

8.2.6 Tieftemperaturverhalten

Die Prüfung des Tieftemperaturverhaltens erfolgte über eine Kombination aus einaxialen Zugversuchen sowie Abkühlversuchen. Da die Durchführung der Untersuchungen an eine geeignete Prüfstelle vergeben wurde, konnten nur zwei der vier Varianten geprüft werden. Die Wahl fiel auf die Varianten Referenz PmB und 25% Epoxy, da bei 25% Epoxydharz der Epoxy Asphalt mutmaßlich spröder ist und somit mögliche Nachteile beim Tieftemperaturverhalten dort am ehesten zu erwarten sind.

Die Ergebnisse der Abkühl- und Einaxialen Zugversuche sind in den Tabellen 13 und 14 sowie in den Abbildungen 44 und 45 dargestellt. Sie beinhalten jeweils die Mittelwerte der kryogenen Zugspannungen, der Zugfestigkeiten und der Zugfestigkeitsreserve sowie das Maximum der Zugfestigkeitsreserve.

Die Variante Referenz PmB zeigt ein der Erfahrung nach günstiges Kälteverhalten für Asphaltdeckschichten. Deutlich wird dies anhand der vergleichsweise tiefen Bruchtemperaturen beim Abkühlversuch in Verbindung mit der Temperatur am Maximum der Zugfestigkeitsreserve. Diese liegt bei etwa -10°C und ist typisch für Deckschichtmischgut aus Splittmastixasphalt.

Tabelle 13: Ergebnisse der Kälteversuche bei der Variante Referenz PmB

Einaxiale Zugversuche								
	Zugfestigkeit [MPa]				Bruchdehnung [%]			
	- 25 °C	- 10 °C	+ 5 °C	+ 20 °C	- 25 °C	- 10 °C	+ 5 °C	+ 20 °C
x ₁	3,1083	4,0416	2,1789	0,3811	0,1967	0,5597	4,6681	12,1897
x ₂	4,0514	4,4003	1,6702	0,5185	0,2342	0,6379	5,0090	10,0571
x ₃	3,5439	3,8175	1,6920	0,4440	(0,9575)	0,5489	5,0908	11,5818
\bar{x}	3,568	4,086	1,847	0,448	0,216	0,582	4,923	11,276
s	0,473	0,294	0,288	0,069	0,027	0,049	0,224	1,099

Abkühlversuche			
	Bruchspannung [MPa]	Bruchtemperatur [°C]	Maximale Zugfestigkeitsreserven
x ₁	3,828	-28,8	3,591 MPa bei -9,4 °C
x ₂	4,000	-29,3	
x ₃	(3,078)	(-34,6)	
\bar{x}	3,914	-29,1	
s	0,122	0,4	

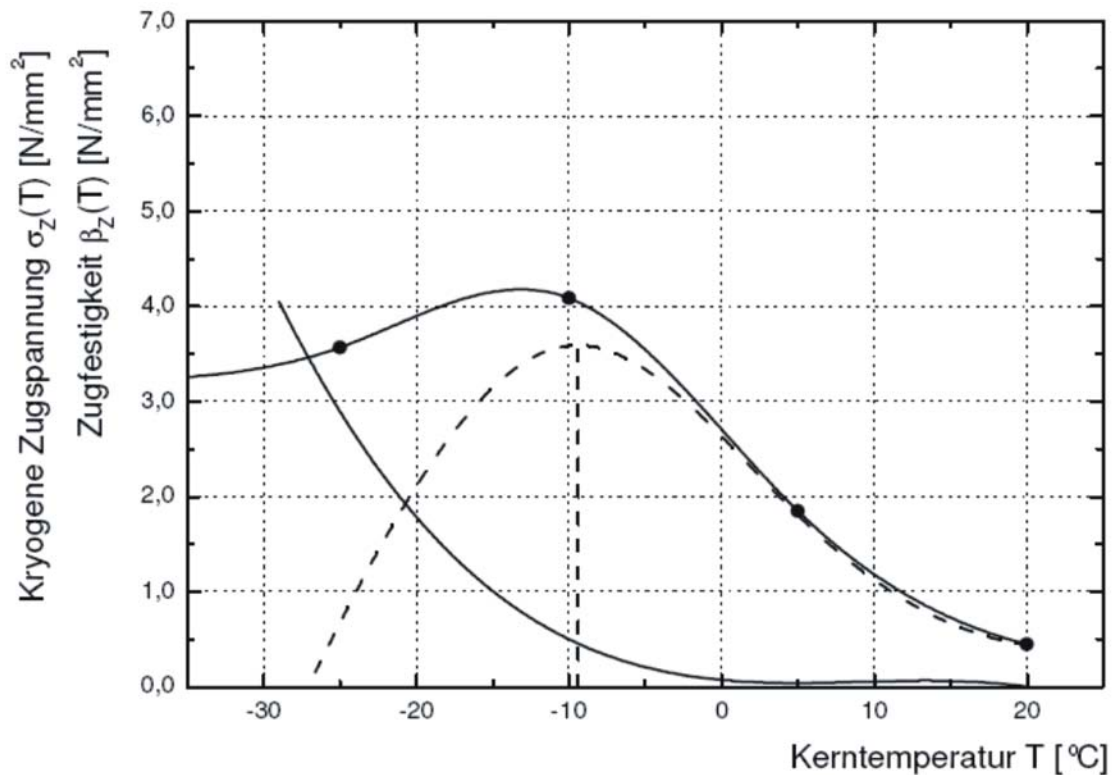


Abbildung 44: grafische Darstellung des Tieftemperaturverhaltens der Variante Referenz PmB

Tabelle 14: Ergebnisse der Kälteversuche bei der Variante 25% Epoxy

Einaxiale Zugversuche								
	Zugfestigkeit [MPa]				Bruchdehnung [‰]			
	- 25 °C	- 10 °C	+ 5 °C	+ 20 °C	- 25 °C	- 10 °C	+ 5 °C	+ 20 °C
x_1	2,9755	4,0623	3,5450	1,4628	0,1380	0,3600	0,6388	0,5174
x_2	2,8676	(3,0674)	3,5149	2,1443	0,1629	(2,6238)	0,6364	0,8065
x_3	3,3294	4,4480	3,6416	1,9400	0,1859	0,3630	0,5423	0,8352
\bar{x}	3,058	4,255	3,567	1,849	0,162	0,362	0,606	0,720
s	0,242	0,273	0,066	0,350	0,024	0,002	0,055	0,176

Abkühlversuche			
	Bruchspannung [MPa]	Bruchtemperatur [°C]	Maximale Zugfestigkeitsreserven
x_1	2,110	-6,4	2,549 MPa bei +0,1 °C
x_2	2,015	-10,9	
x_3	2,299	-19,6	
\bar{x}	2,141	-12,2	
s	0,144	6,6	

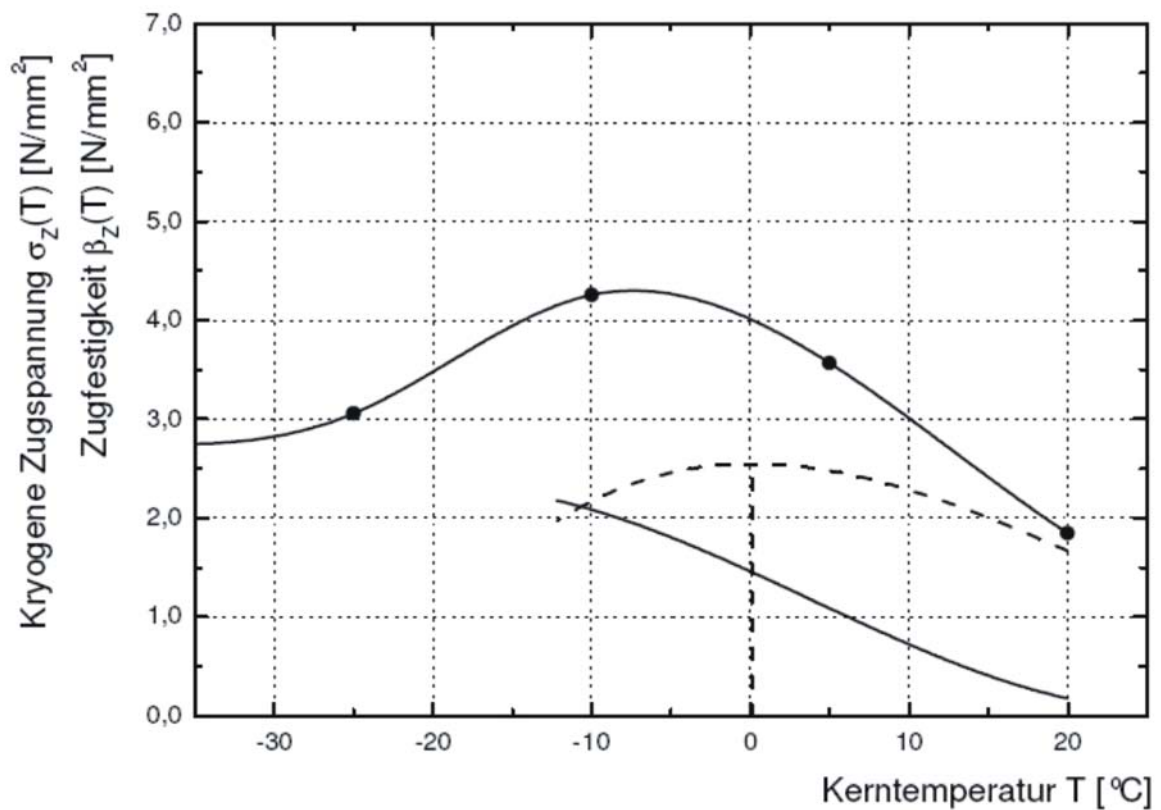


Abbildung 45: grafische Darstellung des Tieftemperaturverhaltens der Variante 25% Epoxy

Die Variante 25% Epoxy zeigt im Abkühlversuch ein für Asphalte völlig untypisches Verhalten. Die kryogenen Zugspannungen steigen nahezu linear an und das bei mittleren Temperaturen üblicherweise noch auftretende Relaxationsverhalten fehlt hier.

Betrachtet man die Einzelwerte der Bruchtemperaturen der Variante 25% Epoxy, so ist festzustellen, dass die gemessenen Werte in einem weiten Bereich streuen. Ein Maximum von $-6,4^{\circ}\text{C}$ und ein Minimum von $-19,6^{\circ}\text{C}$ bedeuten eine unverhältnismäßig große Spannweite von etwa 13°C . Erfahrungsgemäß beträgt die Spanne bei den Bruchtemperaturen für konventionellen Asphalt nur etwa 1 bis 2°C , wie die Ergebnisse der Variante Referenz PmB belegen. Folglich können die Ergebnisse der Abkühlversuche hinsichtlich einer Beurteilung des Tieftemperaturverhaltens nicht herangezogen und abschließend beurteilt werden (siehe hierzu Abschnitt 9).

Verdeutlicht wird dies durch einen Vergleich der gemessenen Bruchspannung mit der Zugfestigkeit bei identischer Temperatur: Bei einer Prüftemperatur von -10°C ist für die Bruchspannung ein Wert von ca. 2,0 MPa ausgewiesen, die Zugfestigkeit bei -10°C beträgt jedoch im Mittel etwa 4,3 MPa und ist somit um mehr als das Doppelte höher als die Bruchspannung. Dieser offensichtliche Widerspruch steht im Gegensatz zu den Erfahrungswerten mit den beiden Prüfverfahren an konventionellem Asphalt. Die Ergebnisse der Variante Referenz PmB belegen diese Einschätzung.

Hinzu kommt, dass die erreichte Zugfestigkeit des Epoxy Asphaltes beim Zugversuch bei den hohen Prüftemperaturen von $+20^{\circ}\text{C}$ und $+5^{\circ}\text{C}$ zwar deutlich über den Werten der Variante Referenz PmB liegt, bei den niedrigen Temperaturen die Verläufe der beiden Varianten jedoch ähnlich sind.

Die geringen Bruchdehnungen bei höheren Temperaturen der Epoxy Variante weisen auf die hohe Steifigkeit des Materials hin.

8.2.7 Ermüdungsbeständigkeit

Die Prüfung der Ermüdungsbeständigkeit erfolgte mittels Dreipunkt-Biegeversuch gemäß Anhang 1.

Abbildung 46 zeigt die Entwicklung der vertikalen Verformungen über die Versuchsdauer und Tabelle 15 die Anzahl der Lastzyklen bis zum Bruch des Probekörpers für jede der geprüften

Varianten. In beiden Fällen handelt es sich jeweils um den Mittelwert aus drei Einzelprüfungen. Die Ergebnisse der Einzelprüfungen können dem Anhang 6 entnommen werden.

Betrachtet man den Verlauf der Verformungen der Variante Referenz 50/70, so ist festzustellen, dass sie das ungünstigste Verhalten aller Varianten besitzt, da der endgültige Bruch des Probekörpers bereits nach ca. 74.000 Lastzyklen erfolgt.

Die Variante Referenz PmB hingegen besitzt einen besseren und länger andauernden Widerstand gegen die aufgetragenen Belastungen als die Variante Referenz 50/70. Der Probekörper zerbricht erst nach ca. 328.000 Lastzyklen.

Ein völlig anderes Verhalten ist bei den beiden Epoxy Varianten zu beobachten. Hier blieben die Probekörper von der aufgetragenen Belastung über die gesamte Versuchsdauer nahezu unberührt. Auch nach einer Million Belastungen konnte nur eine äußerst geringe Verformung des Probekörpers gemessen werden, die sich bereits zu Beginn des Versuchs einstellte und anschließend konstant blieb.

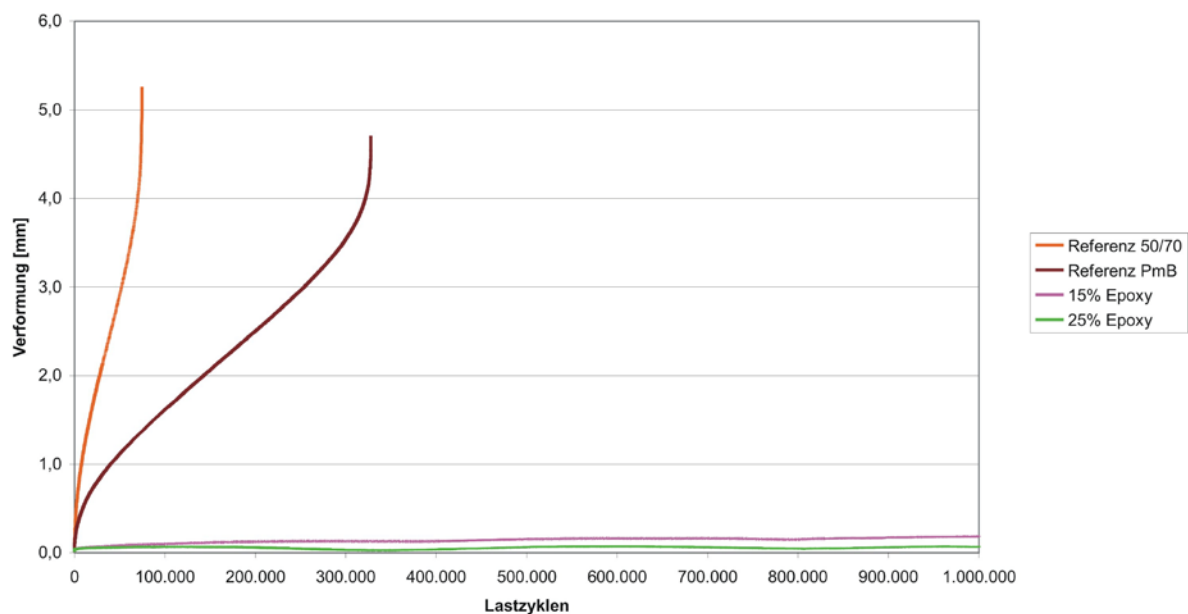


Abbildung 46: Ergebnisse der Dreipunkt-Biegeversuche der geprüften Varianten

Tabelle 15: Anzahl der Lastzyklen bis zum Bruch beim Dreipunkt-Biegeversuch

Variante	Lastzyklen bis zum Bruch
Referenz 50/70	74.400
Referenz PmB	327.700
15% Epoxy	> 1.000.000
25% Epoxy	> 1.000.000

Das statische System der Belastung im Dreipunkt-Biegeversuch entspricht einem statisch bestimmten Balken auf zwei Stützen mit Belastung in Feldmitte (vgl. Abb. 47). Bei Belastung des Probekörpers ergibt sich folglich ein linearer Verlauf des Biegemomentes mit einem Maximum in Feldmitte am Lasteinleitungspunkt.

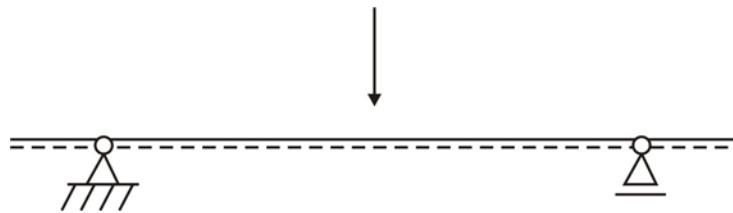


Abbildung 47: statisches System eines Einfeldträgers bei zentrischer Belastung

Die daraus resultierenden Zugspannungen über den Querschnitt sind somit an der Unterseite des Probekörpers am größten. Hier sind mutmaßlich vor dem endgültigen Versagen neben unsichtbaren Mikrorissen auch erste Ermüdungserscheinungen in Form von sichtbar auftretenden Rissen zu erwarten.

Betrachtet man die Unterseite eines Prismas der Variante Referenz PmB, so sind diese kleineren Risse in der Umgebung der endgültigen Bruchstelle deutlich zu erkennen (vgl. Abb. 48).

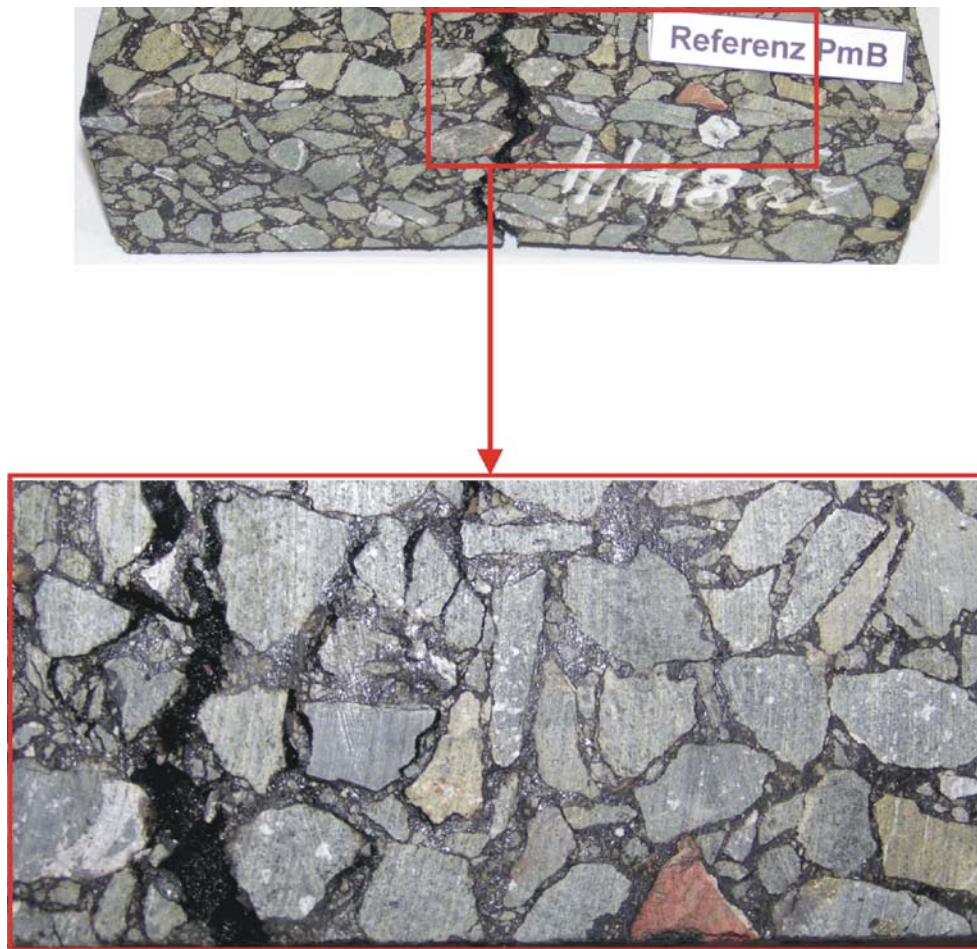


Abbildung 48: Kleinere Risse neben der Bruchstelle bei der Variante Referenz PmB

Bei den Probekörpern aus Epoxy Asphalt hingegen sind auch nach einer Million Lastzyklen keinerlei sichtbare Risse an der Unterseite des Probekörpers zu erkennen, die auf ein mögliches Versagen hindeuten könnten (vgl. Abb. 49).



Abbildung 49: Unterseite eines Prismas der Variante 15% Epoxy nach der Prüfung

Zusammenfassend ist festzustellen, dass mit der Zugabe von Epoxydharz im Asphaltmischgut der Widerstand gegen wiederholte zyklische Belastungen und damit der Ermüdungswiderstand deutlich verbessert werden kann. Eine Erhöhung des Gehaltes an Epoxydharz von 15% auf 25% bringt keine weitere Verbesserung.

9 Bewertung der Ergebnisse

Die Bindemitteluntersuchungen an den Bitumen-Epoxy-Gemischen lieferten als eine wesentliche Erkenntnis, dass die Zugabe des Epoxydharzes eine deutliche Reduzierung der Viskosität bewirkt. Sowohl die Prüfung des Erweichungspunktes und der Duktilität als auch des komplexen Schubmoduls wiesen entsprechende Ergebnisse aus.

Der Grund für diese Reduzierung der Viskosität liegt darin, dass die beiden Komponenten Harz und Härter im Bitumen nicht miteinander reagieren und keine Aushärtung stattfindet. Sie führen zu einer Verflüssigung des Bitumens, die sich in den Ergebnissen der Prüfungen deutlich widerspiegelt.

Es wurde festgestellt, dass die beiden Komponenten Harz und Härter im Asphaltmischgut zwar miteinander reagieren, im Bitumen selbst jedoch nicht. Möglicherweise ist im Asphaltmischgut ein Bestandteil enthalten, der für das Einsetzen der Reaktion verantwortlich ist.

Hier kommen neben den Gesteinskörnungen (Diabas) noch der Füller (Kalksteinmehl) und die Faserstoffe in Betracht. Letzteres kann jedoch aus chemischen Gründen ausgeschlossen werden, da Cellulose nicht die funktionellen Gruppen besitzt, die für die Polymerisation von Harz und Härter (vgl. Abschnitt 2.1.3) benötigt werden. Ob das verwendete Kalksteinmehl oder der eingesetzte Diabas die Ursache für die Reaktion von Harz und Härter im Mischgut sind, wird zu einem späteren Zeitpunkt überprüft (vgl. Abschnitt 10.1).

Eine weitere Möglichkeit für das Ausbleiben der Reaktion von Harz und Härter im Bitumen-Epoxydharz-Gemisch könnte sein, dass der verwendete Anhydridhärter mit den alkalischen Komponenten im Bitumen reagiert und somit die Polymerisation unterbindet. Dies kann über eine Zugabe von Phosphorsäure zum Bitumen überprüft werden, da diese die alkalischen Bestandteile des Bitumens eliminiert (vgl. Abschnitt 10.1).

Für alle überprüften Bindemittleigenschaften gilt, dass die Menge des zugegebenen Epoxydharzes, ob 15% oder 25% Epoxy, keinen Einfluss auf das Prüfergebnis hat.

Die Überprüfung der Mischguteigenschaften begann mit der Untersuchung der Verformungsbeständigkeit bei Wärme. Die Ergebnisse im Spurbildungsversuch zeigten, dass der hergestellte Epoxy Asphalt eine wesentlich verbesserte Spurrinnenresistenz aufweist im Vergleich zu einem konventionellen Asphalt. Im dynamischen Druckschwellversuch konnte ebenfalls ein sehr guter Widerstand gegen Verformungen festgestellt werden. Hier konnte

bei den beiden Epoxy Varianten bis zum Ende der Versuchsdauer kein Wendepunkt in der Verformungskurve ermittelt werden.

Die Untersuchung des Haftverhaltens am Einzelkorn lieferte die Erkenntnis, dass durch die Zugabe des Epoxydharzes die Affinität des Bindemittels zum Gestein wesentlich verbessert werden kann. Bei der Prüfung des Haftverhaltens im Mischgut mittels Spaltzugversuchen war der Abfall der Spaltzugfestigkeit nach Wasserlagerung nur sehr gering (15% Epoxy) bzw. gar nicht vorhanden (25% Epoxy). Somit konnten die Ergebnisse des Rolling Bottle Tests ergänzt und der positive Einfluss des Epoxydharzes auf das Haftverhalten bestätigt werden.

Die Beurteilung der Untersuchungsergebnisse zum Schichtenverbund zwischen Asphaltdeck- und -binderschicht lässt die Schlussfolgerung zu, dass insbesondere unter Beachtung der deutlich geringeren Einbau- und Verdichtungstemperatur bei den Epoxy Varianten die Verwendung von Epoxydharz keinen negativen Einfluss auf die Verklebung mit der Unterlage hat. In vergangenen Untersuchungen [13] werden für die Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner folgende Anforderungswerte für die Schichtgrenze zwischen Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht vorgeschlagen:

Scherkraft: $\geq 25 \text{ kN}$

Scherweg: 2,0 – 4,0 mm (günstiges Bruchverhalten)

Legt man die oben genannten Werte zu Grunde, so erfüllen nahezu alle vier Varianten sowohl hinsichtlich der Scherkraft als auch des Scherweges die gestellten Anforderungen. Lediglich bei der Variante 15% Epoxy liegt der Scherweg mit 1,9 mm knapp unterhalb der vorgeschlagenen Grenze von 2,0 mm.

Die Überprüfung des Tieftemperaturverhaltens mittels einaxialen Zugversuchen und Abkühlversuchen lieferte für die Variante Referenz PmB den Erfahrungswerten entsprechende Ergebnisse. Bei der Variante 25% Epoxy hingegen war die Spannweite der Bruchtemperaturen unverhältnismäßig groß und die ermittelten Bruchspannungen standen in erheblichem Widerspruch zu den vorhandenen Zugfestigkeiten. Aufgrund dieser Feststellungen kommt man zu dem Schluss, dass für die Überprüfung der Kälteeigenschaften des Epoxy Asphaltes die Kombination dieser beiden Prüfverfahren nicht geeignet ist bzw. die auf das Kälteverhalten von konventionellem Asphalt abgestimmten Prüfparameter nicht unmittelbar auf eine Prüfung von Epoxy Asphalt übertragen werden können.

Da die Überprüfung des Tieftemperaturverhaltens gemäß Anhang 1 nicht selbst durchgeführt wurde, konnten keine weiteren Versuche zur Optimierung der Prüfbedingungen erfolgen.

Eine abschließende Beurteilung des Kälteverhaltens von Epoxy Asphalt kann somit an dieser Stelle nicht vorgenommen werden. Daher gilt es zu überprüfen, ob sich hierfür gegebenenfalls ein alternatives Prüfverfahren anbietet (vgl. Abschnitt 10.5).

Die durchgeführten Dreipunkt-Biegeversuche haben gezeigt, dass mit der Zugabe von Epoxydharz in das Asphaltmischgut der Widerstand gegen wiederholte zyklische Belastungen und damit der Ermüdungswiderstand deutlich verbessert werden kann. Während die Probekörper aus konventionellem Asphalt bereits nach einer geringen Anzahl an Lastzyklen versagten, stellte sich bei den beiden Epoxy Varianten zu Beginn der Prüfung eine äußerst geringe Verformung ein, die anschließend konstant blieb. Ein Versagen des Probekörpers deutete sich über die gesamte Versuchsdauer nicht an.

Um einen Überblick über den Einfluss einer Zugabe von Epoxydharz im Asphaltmischgut auf die hier geprüften Asphalteigenschaften zu bekommen, werden im Folgenden die im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchungen erzielten Ergebnisse gegenübergestellt.

Bewertungsgrundlage bilden hierfür die festgestellten Eigenschaften der Variante Referenz 50/70. Für jede geprüfte Eigenschaft wird die Differenz zwischen dem Wert der zu betrachtenden Variante und dem Wert der Variante Referenz 50/70 gebildet und anschließend als prozentuale Veränderung angegeben. Jede Angabe in Prozent bedeutet somit eine Veränderung bezogen auf das Niveau der Variante Referenz 50/70.

Für das Beispiel der Eigenschaft „Spurrinnenresistenz“ bedeutet dies konkret:

Die Variante Referenz 50/70 besaß nach 20.000 Überrollungen eine Spurrinnentiefe von etwa 4,25 mm. Dieser Wert bildet nun die Bewertungsgrundlage für die anderen Varianten:

Referenz PmB: 2,80 mm, d. h. eine Veränderung um 1,45 mm

Daraus resultiert eine prozentuale Verbesserung von:

$$\frac{1,45 \cdot 100}{4,25} = 34\%$$

Analog bedeutet dies für die beiden Epoxy Varianten:

$$15\% \text{ Epoxy: } \frac{(4,25 - 1,44) \cdot 100}{4,25} = 66\%$$

$$\text{25\% Epoxy: } \frac{(4,25 - 1,12) \cdot 100}{4,25} = 74\%$$

Für alle geprüften Eigenschaften wurden entsprechend dem oben beschriebenen Vorgehen die prozentualen Veränderungen bezogen auf die Eigenschaften der Variante Referenz 50/70 berechnet. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 16 sowie in den Abbildungen 50 und 51 dargestellt.

Tabelle 16: Prozentuale Veränderung maßgebender Asphalteigenschaften durch Epoxydharz bezogen auf die Eigenschaften der Variante Referenz 50/70

Eigenschaft	Referenz PmB	15% Epoxy	25% Epoxy
Verformungsbeständigkeit im Spurbildungsversuch	34%	66%	74%
Verformungsbeständigkeit im Druckschwellversuch	98%	> 494%	> 494%
Affinität (Einzelkorn)	45%	67%	67%
Haftverhalten (Mischgut)	8%	11%	17%
Spaltzugfestigkeit (vor Wasserlagerung)	21%	3%	12%
Schichtenverbund	35%	13%	19%
Ermüdungsbeständigkeit	340%	> 1244%	> 1244%

Bei den Eigenschaften Verformungsbeständigkeit im Druckschwellversuch und Ermüdungsbeständigkeit war selbst nach einer Belastungsdauer, die das fünffache bzw. zwölffache über der Belastungsdauer der Referenzvariante mit Straßenbaubitumen lag, kein Versagen der Probekörper festzustellen.

Aus diesem Grund werden die prozentualen Veränderungen dieser beiden Eigenschaften nicht mit den übrigen Eigenschaften in einem Diagramm dargestellt, da es sich bei den Werten nur um ein mess- und aufzeichnungsbedingtes Minimum handelt und diese zu einer unverhältnismäßigen Verzerrung der Skalierung führen würden.

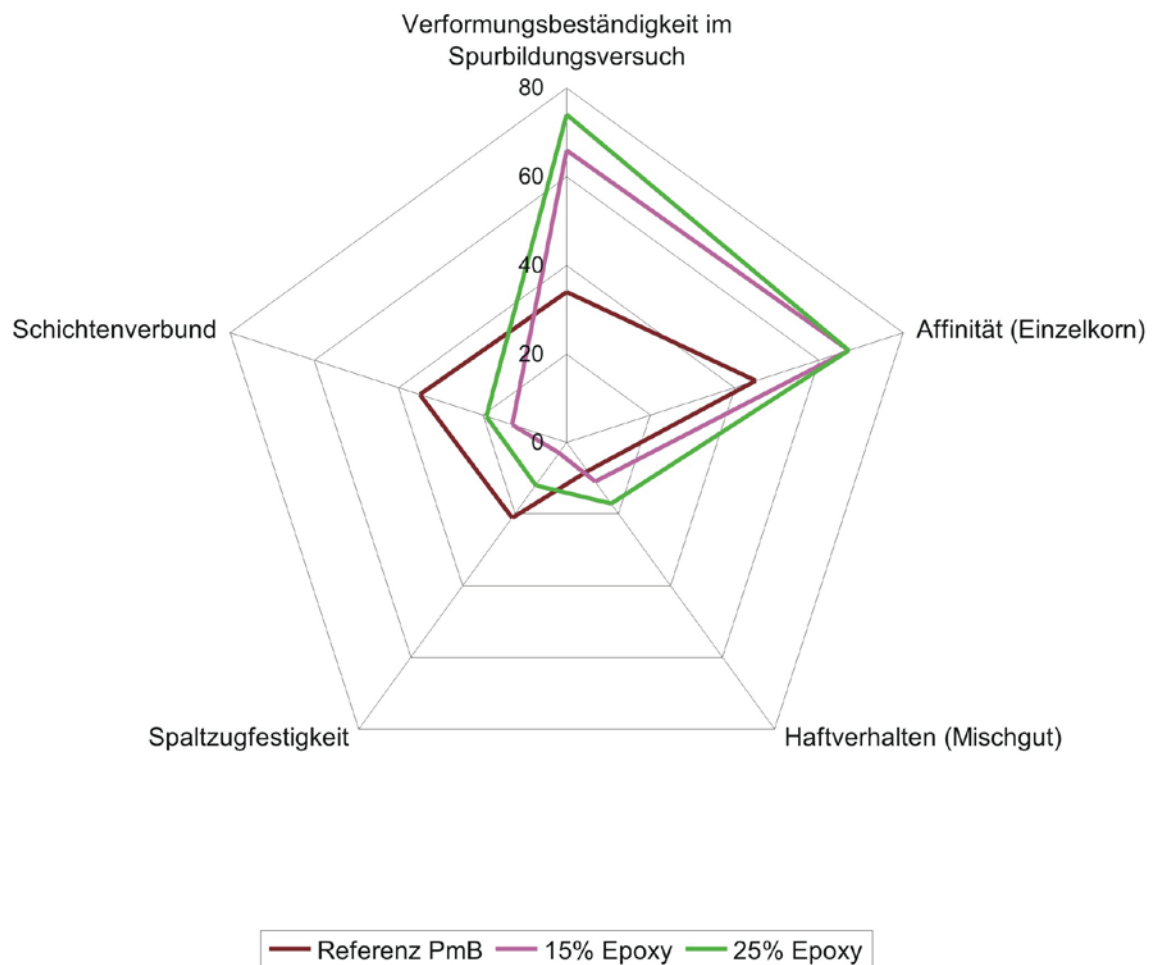


Abbildung 50: Veränderung maßgebender Asphalteigenschaften durch Epoxydharz bezogen auf die Eigenschaften der Variante Referenz 50/70 in [%]

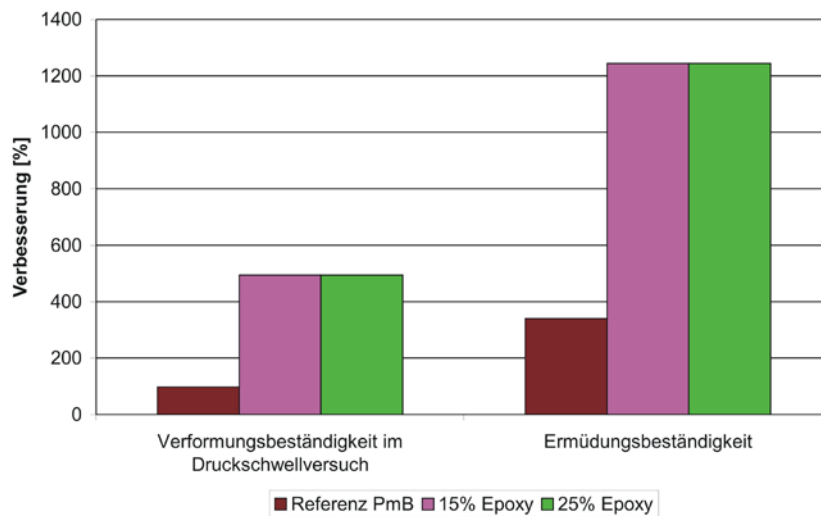


Abbildung 51: Prozentuale Veränderung von zwei Asphalteigenschaften durch Epoxydharz bezogen auf die Eigenschaften der Variante Referenz 50/70

Die grafische Darstellung der Veränderungen der Asphalteigenschaften durch Epoxydharz zeigt, dass mit Ausnahme der Spaltzugfestigkeit und mit Abstrichen des Schichtenverbundes (unterschiedliche Temperaturen) sämtliche geprüften Eigenschaften des Epoxy Asphalts besser zu beurteilen sind als bei beiden Referenzvarianten.

Als Ziel dieser Arbeit wurde die Entwicklung eines hochstandfesten und langlebigen Deckschichtbelag aus Asphalt formuliert. Daher gilt es nun an dieser Stelle zu überprüfen, ob diese Ziele mit dem hier entwickelten und untersuchten Epoxy Asphalt erreicht werden konnten.

Beide Epoxy Varianten besitzen eine deutlich bessere Verformungsbeständigkeit bei hohen Temperaturen, wie die Ergebnisse der Spurbildungs- und der dynamischen Druckschwellversuche gezeigt haben. Die Probekörper aus Epoxy Asphalt wiesen erheblich kleinere Verformungen als die Probekörper der Referenzvarianten auf.

Somit kann die Forderung nach einer hohen Verformungsbeständigkeit als erfüllt betrachtet werden.

Sowohl das Haftverhalten am Einzelkorn als auch im Mischgut konnte durch die Zugabe von Epoxydharz verbessert und die Gefahr von Schäden durch Wasserzutritt und Feuchtigkeit minimiert werden. Eine ausreichende Verklebung zwischen der Asphaltbinderschicht und der Deckschicht aus Epoxy Asphalt kann gewährleistet werden. Die Gefahr einer Ablösung aufgrund mangelndem Schichtenverbund kann folglich nicht gesehen werden. Die Ermüdungsbeständigkeit des Epoxy Asphaltes ist wesentlich höher als bei einem konventionellen

Asphaltmischgut. Während die Probekörper der Referenzvarianten frühzeitig versagten, zeigten die Probekörper der beiden Epoxy Varianten auch nach Ablauf der Belastungsdauer nur sehr geringe Verformungen.

Folglich kann auch die Zielsetzung der Langlebigkeit als erreicht angesehen werden.

Darüber hinaus lassen die Verbesserungen der Eigenschaften aber auch erkennen, dass eine Zugabe von 25% Epoxydharz zwar vereinzelt geringfügig bessere Ergebnisse zeigt als bei „nur“ 15%, an vielen Stellen die Ergebnisse jedoch nahezu identisch ausfallen.

Als Fazit ist nach Abschluss der bisher durchgeführten Prüfungen festzustellen, dass

- eine Zugabe von 15% Epoxydharz im Asphaltmischgut für die Sicherstellung einer hohen Verformungsbeständigkeit und Langlebigkeit ausreichend ist,
- die Vorteile bei einer Zugabe von 25% Epoxydharz gegenüber 15% vernachlässigbar sind,
- zusätzlich die Kosten bei einer Verwendung von 25% Epoxydharz höher ausfallen würden.

Aus den oben genannten Gründen wird daher für die weiterführenden Untersuchungen in Phase III nur die Variante 15% Epoxy betrachtet.

III.

Weiterführende Untersuchungen

10 Spezielle Fragestellungen

Im Zuge der Bearbeitung der ersten beiden Phasen ergaben sich weitere spezielle Fragestellungen, die über den Rahmen der grundsätzlichen und standardisierten Prüfungen hinaus gehen. Um auch diesen Fragestellungen nachzugehen, wurden zusätzlich einige weiterführende Untersuchungen durchgeführt. Dies waren im Einzelnen:

- Reaktion des Epoxydharzes im Bitumen
- Extraktion von Epoxy Asphalt
- Bewitterungsversuche
- Griffigkeitsentwicklung unter Verkehr
- Widerstand gegen eine Dauerbelastung bei tiefen Temperaturen
- Arbeits- und Umweltschutz
- Voraussetzungen für Feldversuche

10.1 Reaktion des Epoxydharzes im Bitumen

Die Bindemitteluntersuchungen an den Bitumen-Epoxy-Gemischen haben gezeigt, dass die beiden Komponenten Harz und Härter alleine im Bitumen nicht mit einander reagieren. Eine Aushärtung des Gemisches findet somit nicht statt.

Als mögliche Ursachen konnten bereits das im Asphaltmischgut eingesetzte Kalksteinmehl und der verwendete Diabas sowie die alkalischen Komponenten des Bitumens identifiziert werden. Mit Hilfe des Prüfverfahrens „Erweichungspunkt Ring und Kugel“ wurde daher überprüft, ob die aufgestellten Vermutungen zutreffend sind.

Hierzu wurde in einem ersten Schritt ein Gemisch aus 35% Bitumen und 65% des verwendeten Kalksteinmehls hergestellt und daran der Erweichungspunkt gemäß Anhang 1 ermittelt. Ebenso wurde ein Bitumen-Epoxy-Gemisch mit Kalksteinmehl im selben Verhältnis vermengt und geprüft. Das Bitumen-Epoxy-Gemisch wurde vor der Zugabe des Füllers analog zum Asphaltmischgut für 30 Minuten bei 130°C temperiert.

Dieses Vorgehen wurde ebenfalls mit dem Eigenfüller des Diabas (abgesiebt aus der Lieferkörnung 0/2) durchgeführt, um den Einfluss des verwendeten Gesteins zu überprüfen. Das Verhältnis von Bindemittel zu Füller betrug hier jedoch 50% : 50%, da der Eigenfüller eine deutlich größere Oberfläche als das Kalksteinmehl besitzt und daher mehr Bindemittel benötigt.

Die Erweichungspunkte der unterschiedlichen Gemische sind in der nachfolgenden Tabelle 17 aufgeführt.

Tabelle 17: Erweichungspunkte Ring und Kugel von Bindemittel-Füller-Gemischen in °C

	50/70 + Kalksteinmehl	50/70 + Epoxy + Kalksteinmehl	50/70 + Eigenfüller	50/70 + Epoxy + Eigenfüller
Probe 1	66,7	65,3	62,2	57,7
Probe 2	66,8	65,3	62,6	57,7
Mittelwert	66,8	65,3	62,4	57,7

Die Untersuchungen mit Kalksteinmehl lieferten für beide Varianten einen nahezu gleichen Erweichungspunkt. Der im Zuge der Bindemitteluntersuchungen ermittelte Unterschied zwischen der Referenz- und der Epoxy Variante von etwa 10°C war hier nicht festzustellen. Ein deutlicher Anstieg des Erweichungspunktes verursacht durch eine Reaktion von Harz und Härter allerdings ebenfalls nicht.

Bei einer Verwendung des Eigenfüllers liegt der Erweichungspunkt der Variante mit Epoxydharz um etwa 5°C unter der Variante mit reinem Straßenbaubitumen. Die Tendenz des niedrigeren Erweichungspunktes bei einer Zugabe von Epoxydharz bestätigte sich somit auch hier.

Zur Klärung der Frage, ob die alkalischen Komponenten im Bitumen mit dem Anhydridhärter des Epoxydharzsystems reagieren und somit die Aushärtung des Harzes verhindern, wurde ebenfalls die Prüfung des Erweichungspunktes herangezogen. Allerdings wurde das Grund-

bitumen 50/70 zu diesem Zweck mit 3% Phosphorsäure versetzt, das dessen alkalische Bestandteile eliminiert. Ansonsten erfolgte die Prüfung analog zu dem in Anhang 1 beschriebenen Vorgehen.

Die Ergebnisse der Erweichungspunkte Ring und Kugel sind in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Erweichungspunkte Ring und Kugel von Bindemittelgemischen mit Phosphorsäure in °C

	50/70 + Phosphorsäure	50/70 + Phosphorsäure + Epoxy
Probe 1	59,8	53,2
Probe 2	58,9	53,1
Mittelwert	59,4	53,2

Wie die Ergebnisse in Tabelle 18 zeigen, brachte auch die Zugabe der Phosphorsäure zum Bitumen nicht den vermuteten Effekt. Der Erweichungspunkt der Epoxy Variante liegt erneut um etwa 6°C unter der Variante ohne Epoxydharz. Somit fand auch in diesem Fall keine Aushärtung des Zweikomponentensystems statt.

Die oben beschriebenen Untersuchungen konnten keine Erklärung für das Ausbleiben der Reaktion von Harz und Härter im Bitumen liefern. Somit muss diese Fragestellung hier offen bleiben und wird, vor allem aufgrund der nachweislichen Reaktion im Asphaltmischgut, im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

10.2 Extraktion von Epoxy Asphalt

Einer der bisher unbehandelten Aspekte bei der Verwendung von Epoxy Asphalt betrifft die Extrahierbarkeit des Mischgutes. Im Zuge von Kontrollprüfungen bei Straßenbaumaßnahmen in Asphaltbauweise ist eine Extraktion des verwendeten Mischgutes von entscheidender Bedeutung, um die Zusammensetzung des tatsächlich eingebauten Mischgutes mit den Vorgaben der Eignungsprüfung vergleichen zu können.

Daher erscheint es notwendig zu prüfen, ob bzw. inwiefern Epoxy Asphalt extrahiert, d. h. das Bindemittelgemisch bestehend aus Straßenbaubitumen und Epoxydharz aus dem Asphaltmischgut mit Hilfe eines Lösemittels extrahiert werden kann. Unklar ist die Beantwortung dieser Fragestellung vor allem aufgrund der Tatsache, dass das reine ausgehärtete Epoxydharz als solches lösemittelbeständig ist.

Für die Überprüfung der Extrahierbarkeit wurde zunächst untersucht, ob es überhaupt möglich ist, einen Probekörper aus Epoxy Asphalt aufzuschmelzen und zu granulieren. Nach einer Lagerung im Ofen bei 140°C ließ sich der Probekörper (Variante 15% Epoxy) aufbrechen und granulieren. Der Kraftaufwand war zwar etwas höher als bei konventionellem Asphaltmischgut, die Granulierung konnte dennoch problemlos erfolgen (vgl. Abb. 52).

Nachdem die Frage des Aufschmelzens und der Granulierbarkeit erfolgreich beantwortet war, wurde versucht, bei einem Teil des Granulates mittels Heißextraktion gemäß DIN EN 12697-1, „Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 1: Löslicher Bindemittelgehalt“ [14] das Bindemittelgemisch aus dem Mischgut zu extrahieren. Nach erfolgreicher Extraktion wurden anschließend die Feinanteile aus dem Bindemittel-Lösemittelgemisch gewonnen sowie Lösemittel und Bindemittel mittels Destillation voneinander getrennt.

Als Ergebnis der Heißextraktion standen folglich das Gesteinskörnungsgemisch, der Füller (vgl. Abb. 53 und 54) aus der Zentrifuge, das Bindemittel sowie das aus der Destillation zurückgewonnene Lösemittel für weitere Untersuchungen zur Verfügung.



Abbildung 52: Granulierung eines Probekörpers aus Epoxy Asphalt

Nach Beendigung der Extraktion stellte sich zwangsläufig die Frage nach dem Verbleib des Epoxydharzes. Wo sind die Bestandteile des Zweikomponentensystems nach dem Herauslösen des Bindemittels; im Bitumen, am Gestein, im Füller oder im Lösemittel?

Betrachtet man das Gesteinskörnungsgemisch nach der Extraktion, so fällt zunächst auf, dass ein Teil der Feinanteile an den groben Gesteinskörnern zu kleben scheint. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass Bestandteile des Epoxydharzes am Gestein haften geblieben sind.



Abbildung 53: Gesteinskörnungsgemisch aus extrahiertem Epoxy Asphalt



Abbildung 54: Füller aus extrahiertem Epoxy Asphalt

Der Füller aus dem extrahierten Epoxy Asphalt schien nach dem Entleeren der Hülse aus der Zentrifuge untereinander verklebt zu sein. Er zerfiel in größere und relativ brüchige Teile (vgl. Abb. 54) und war nicht mehr pulverförmig wie das verwendete Ausgangsmaterial. Somit wäre es möglich, dass auch ein Teil des Epoxydharzes nach der Extraktion im Füller verblieben ist.

Um dieser Fragestellung nachzugehen und eine wissenschaftlich fundierte Erkenntnis über den Verbleib des Epoxydharzes zu erhalten, wurden die Bestandteile des extrahierten Epoxy Asphaltes einer physikalisch-chemischen Analyse unterzogen.

In einem ersten Schritt wurde sowohl das zurückgewonnene Bindemittel als auch der Füller mit Hilfe einer Infrarotspektroskopie untersucht.

Die Infrarotspektroskopie ist ein Analyseverfahren, das mit infrarotem Licht arbeitet. Sie wird zur quantitativen Bestimmung von bekannten Substanzen, deren Identifikation anhand eines Referenzspektrums oder zur Strukturaufklärung unbekannter Substanzen genutzt. Sie ist eine der leistungsfähigsten analytischen Verfahren in der chemischen Analytik organischer Substanzen und wird zur schnellen Analyse von Stoffgemischen eingesetzt.

Im Falle des Bindemittels war festzustellen, dass es neben dem Ausgangsbitumen auch Epoxydharz enthält, jedoch nur noch etwa 60% von der ursprünglich bei der Mischgutherstellung zugebenen Menge. Dieser Wert konnte ermittelt werden, indem sowohl eine Spektroskopie des Bitumen-Epoxy-Gemisches nach der Extraktion und des ursprünglichen Ausgangsgemisches vor Zugabe in den Labormischer erstellt wurde und von beiden das Spektrum des reinen Straßenbaubitumens subtrahiert wurde. Als Ergebnis erhält man die Spektren der Epoxydharze aus den beiden Gemischen (vgl. Abb. 55). Mittels Differenzbildung war ein Verlust von etwa 40% festzustellen.

Die Analyse des Füllers zeigte, dass dieser neben Calciumcarbonat auch noch andere Ausschläge, sowohl von anorganischem als auch von organischem Material wie Epoxydharz aufweist. Eine genaue Bestimmung der Menge an Epoxydharz im Füller war nicht möglich.

Abschließend wurde das extrahierte Gesteinskörnungsgemisch einer thermogravimetrischen Analyse unterzogen, um zu überprüfen, ob in ihm Bestandteile von Epoxydharz zu finden sind.

Die Thermogravimetrie ist eine analytische Methode, bei der die Masseänderung einer Probe in Abhängigkeit von der Temperatur und Zeit gemessen wird. Die Probe wird dazu in einem kleinen Tiegel aus feuerfestem, inertem Material (z.B. Platin oder Aluminiumoxid) in einem

Ofen auf Temperaturen bis zu 1600 °C erhitzt. Der Probenhalter ist an eine Mikrowaage gekoppelt, welche die Masseänderungen während des Aufheizvorgangs registriert. Während der Analyse wird der Probenraum je nach Bedarf mit verschiedenen Gasen gespült. Meist verwendet man reinen Stickstoff, um eine Oxidation zu vermeiden.

Die Abbildung 56 zeigt die Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse des Gesteinskörnungsgemisches nach der Extraktion sowie der frischen und unbehandelten Gesteinskörnung. Das Ausgangsgestein hat im unteren Temperaturbereich (452°C) eine Massenstufe (-2,72% Massenänderung) während das Gestein aus der Extraktion zwei Massenstufen aufweist (-1,01% bei 239,8°C und -1,36% bei 476,4°C). Dies lässt darauf schließen, dass im extrahierten Gestein noch andere organische Stoffe vorhanden sind. Selbst wenn es sich bei einem dieser Stoffe um Epoxydharz handeln sollte, so wäre die Menge bezogen auf die im Bitumen fehlenden 40% jedoch sehr gering.

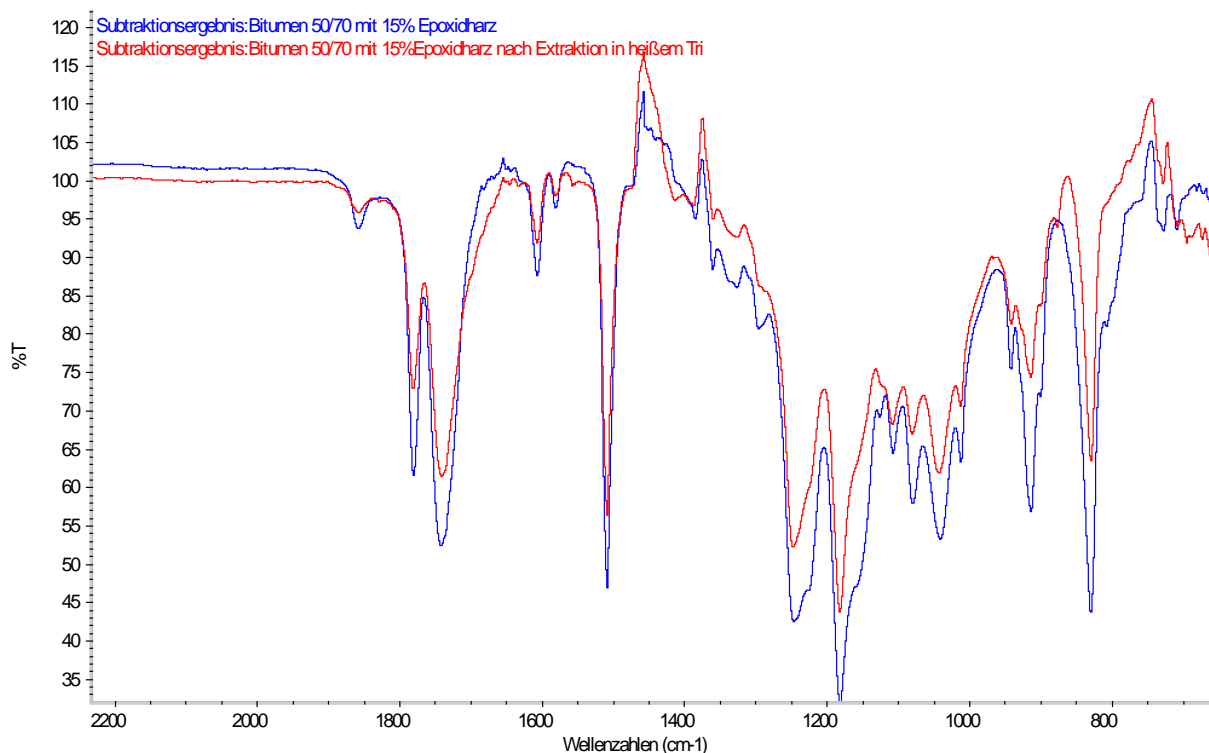


Abbildung 55: IR-Spektren von Epoxydharzen aus Bindemittelgemischen vor und nach Extraktion

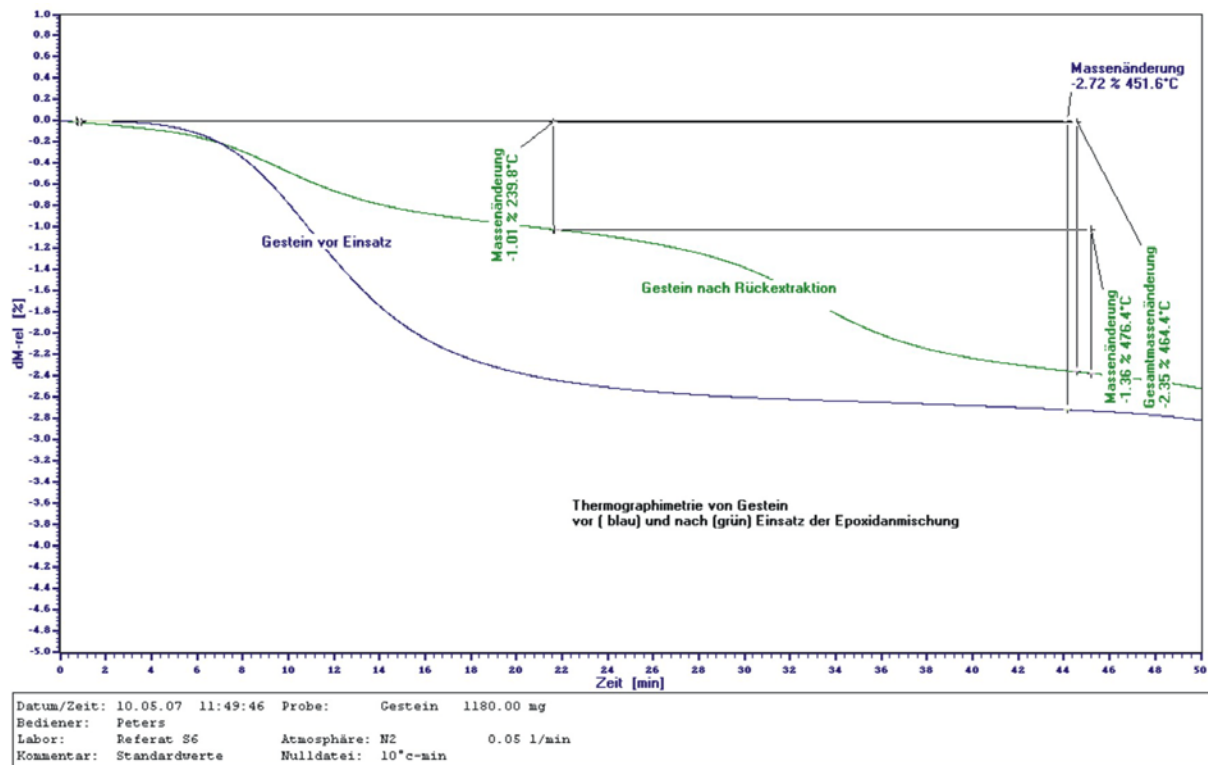


Abbildung 56: Thermogravimetrische Untersuchung von Gesteinen vor und nach Extraktion

Da im Bindemittel nur 60% der ursprünglich zugegebenen Menge an Epoxydharz enthalten sind und sowohl im Füller als auch am Gestein nur äußerst geringe Mengen Epoxydharz nachzuweisen waren, stellt sich die Frage nach dem Verbleib der restlichen Mengen des Zweikomponentensystems.

Das Lösemittel (Trichlorethylen) aus der Extraktion kann hier ausgeschlossen werden, da es mittels Destillation vom Bindemittel getrennt wurde. Möglicherweise ist ein Teil des Epoxydharzes im Inneren der Gesteinskörner vorhanden und/oder ein geringer Teil bereits bei der Herstellung des Asphaltmischgutes verdampft (hohe Temperaturen, beobachtete Dampfentwicklung). In beiden Fällen ist jedoch nicht davon auszugehen, dass die betreffenden Mengen eine Größenordnung von bis zu 40% betragen.

Zusammenfassend ist daher festzustellen, dass an dieser Stelle noch weiterer Forschungsbedarf besteht, da im Rahmen von Kontrollprüfungen am Mischgut lediglich die Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches und der Bindemittelgehalt beurteilt werden könnte.

Für eine genaue Überprüfung der Bindemittleigenschaften nach Extraktion sind aufgrund der oben beschriebenen Feststellungen weitere Untersuchungen durchzuführen.

10.3 Bewitterungsversuche

Bereits vor Beginn der Hauptuntersuchungen wurden einige WSV-Platten aus Epoxy Asphalt mit einem Epoxydharzsystem mit Anhydridhärter sowohl mit als auch ohne Beschleuniger hergestellt und einer mehrere Monate andauernden Bewitterung im Freien ausgesetzt. Da zum Zeitpunkt des Beginns der Bewitterung jedoch noch nicht bekannt war, mit welchem System die Hauptuntersuchungen durchgeführt und eine möglichst lange Bewitterungsdauer sichergestellt werden sollte, erfolgte die Herstellung von Probekörpern beider Systeme. Da sich die Variante ohne Beschleuniger im Verlaufe der Untersuchungen als die geeignetere herausstellte und folglich die Hauptuntersuchungen sowie sämtliche weiterführende Untersuchungen mit dem System ohne Beschleuniger ausgeführt wurden, werden im Folgenden die Ergebnisse der Platten mit Beschleuniger nicht betrachtet.

Nach Herstellung der Platten im Laboratorium wurden diese während der Zeit von Juni 2006 bis April 2007 im Freien gelagert (vgl. Abb. 57) und zunächst eine eventuelle witterungsbedingte Veränderung der Oberfläche des Epoxy Asphaltes überprüft. Dies erfolgte mittels einer monatlichen Messung mit dem Pendelgerät (engl.: Skid Resistance Tester, SRT) gemäß „Technischer Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, Teil: Messverfahren SRT“ (TP Griff-StB (SRT)) [15]. Während der Bewitterungsphase konnte sichergestellt werden, dass die Probekörper sowohl sehr hohen Temperaturen im Sommer als auch niedrigen Temperaturen im Winter ausgesetzt waren. Zudem sorgte ein ständiger Wechsel von trockenen und nassen Phasen für eine zusätzliche Beanspruchung des Asphaltes.

Die Ergebnisse der Pendelmessungen über die Bewitterungsdauer sind in der Abbildung 58 dargestellt. Neben den ebenfalls in den Hauptuntersuchungen geprüften Varianten 15% Epoxy und 25% Epoxy sowie der Variante Referenz 50/70 fehlt hier die Variante Referenz PmB, da zum Zeitpunkt des Bewitterungsbeginns die Aufnahme der Variante Referenz PmB noch nicht zur Diskussion stand.



Abbildung 57: Bewitterung von Probekörpern aus Epoxy Asphalt

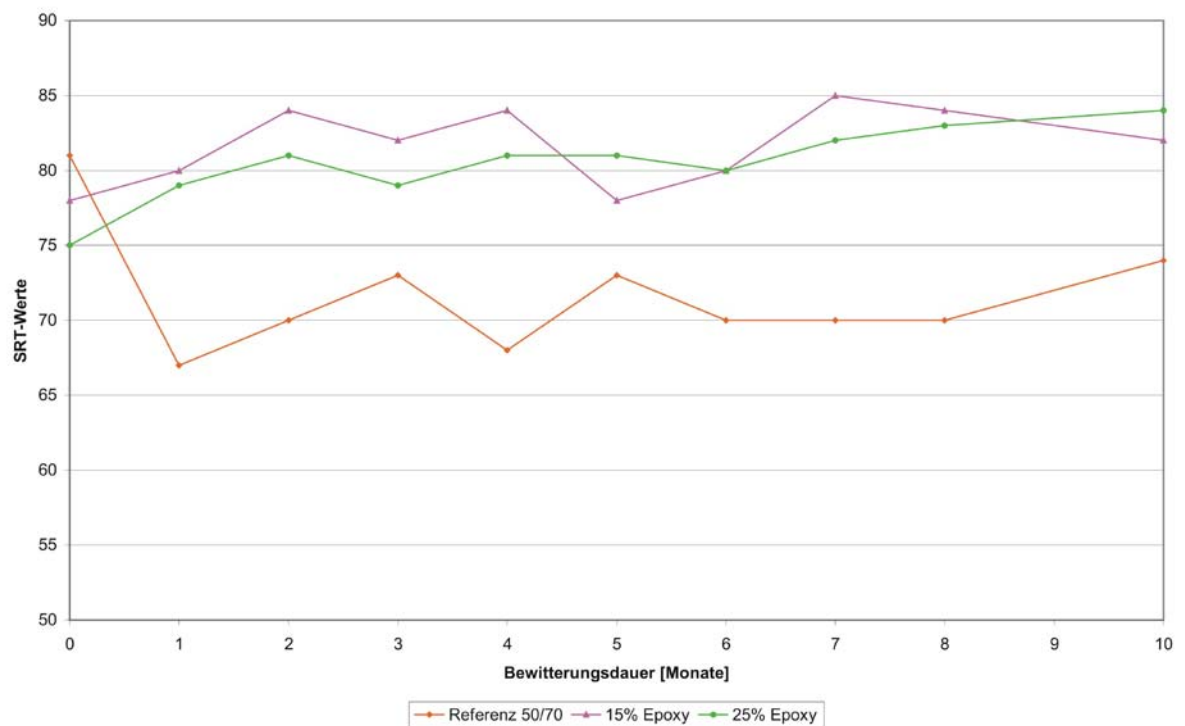


Abbildung 58: SRT-Messungen während der Bewitterungsdauer

Betrachtet man die Verläufe der SRT-Einheiten der drei Varianten, so stellt man fest, dass die beiden Epoxy Varianten im Mittel eine um etwa 10 SRT-Einheiten höhere Rauheit aufweisen als die Variante Referenz 50/70. Ferner ist zu beobachten, dass bei beiden Epoxy Varianten innerhalb der ersten zwei Monate die Rauheit um sechs SRT-Einheiten zugenommen hat, wohingegen die Referenzvariante einen Griffigkeitsverlust von etwa 10 SRT-Einheiten aufwies.

Ansonsten bleibt über die Dauer der Bewitterung gesehen die Rauheit aller Varianten nahezu konstant und schwankt bei der Variante Referenz 50/70 um den Wert von 70 Einheiten und bei den Epoxy Varianten in einem Bereich von 80 bis 85 SRT-Einheiten. Ein merklicher Einfluss einzelner jahreszeitlicher und damit klimatischer Veränderungen auf die Mikrorauheit ist nicht festzustellen.

Während der Liegezeit der Probekörper im Freien war eine Veränderung der Oberflächen bei den Platten aus Epoxy Asphalt festzustellen. Im Laufe der Zeit wurden diese in Abhängigkeit vom Epoxy Gehalt deutlich heller. Je mehr Epoxydharz im Mischgut enthalten war, desto größer war der aufhellende Effekt an der Oberfläche. Somit ist die Aufhellung eindeutig vom Epoxydharz verursacht, das mutmaßlich unter Sonneneinstrahlung zu einer Aufhellung des Asphaltes führt.

In den Abbildungen 59 bis 60 sind die unterschiedlichen Oberflächen der Asphaltplatten der Varianten Referenz 50/70 sowie 25% Epoxy dargestellt. Der aufhellende Effekt des Epoxydharzes nach der Bewitterung (rechte Fotos) ist deutlich zu erkennen.

Nach Beendigung der Bewitterungszeit wurden aus den gealterten Platten Prismen geschnitten, um daran ebenfalls Dreipunkt-Biegeversuche durchzuführen. Ziel dieser Untersuchungen war es festzustellen, ob die Bewitterung möglicherweise einen negativen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit des Epoxy Asphaltes hat.

Die Versuchsdurchführung erfolgte gemäß Anhang 1 und führte zu den in Abbildung 61 dargestellten Ergebnissen. Ein direkter Vergleich der Verformungsverläufe von bewitterten und nicht bewitterten Probekörpern der drei geprüften Varianten ist in den Abbildungen 62 bis 64 dargestellt. Die abschnittsweise unterschiedlichen Strichbreiten sind bedingt durch die Datenverarbeitung.

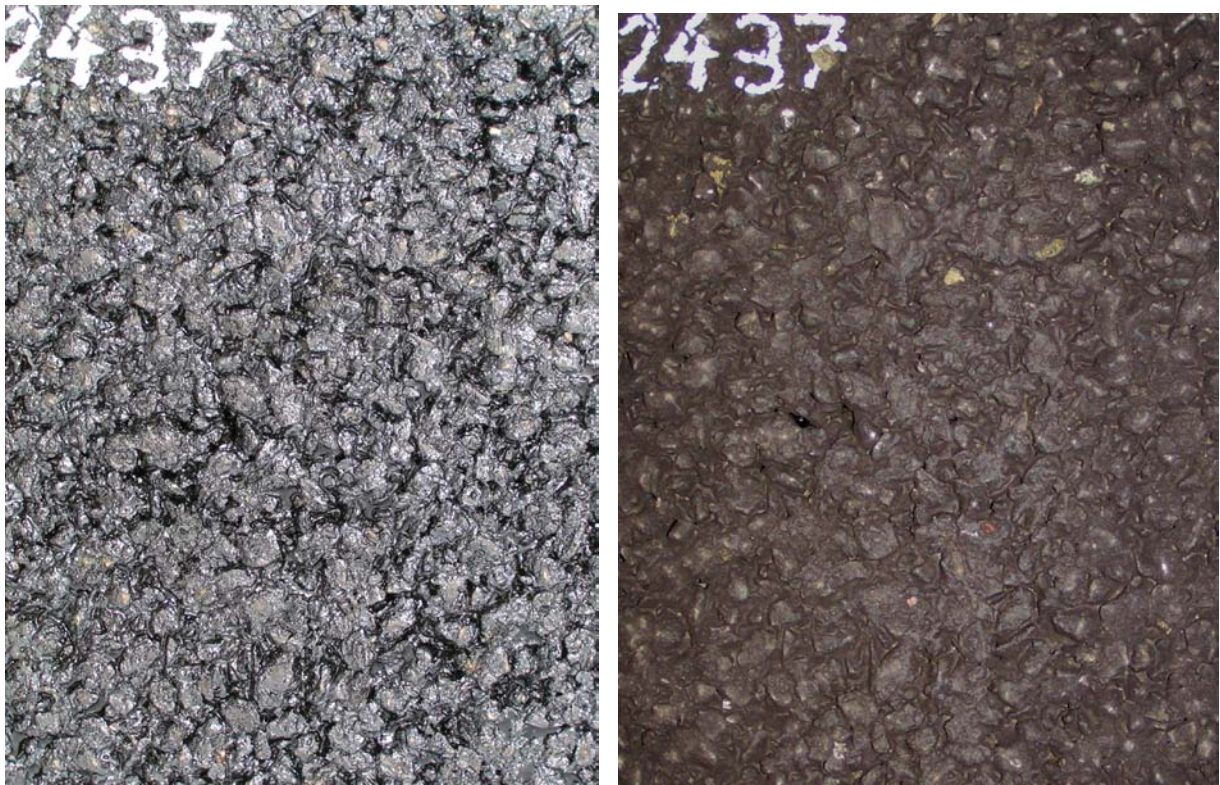


Abbildung 59: Platten der Variante Referenz 50/70 vor (links) und nach (rechts) der Bewitterung

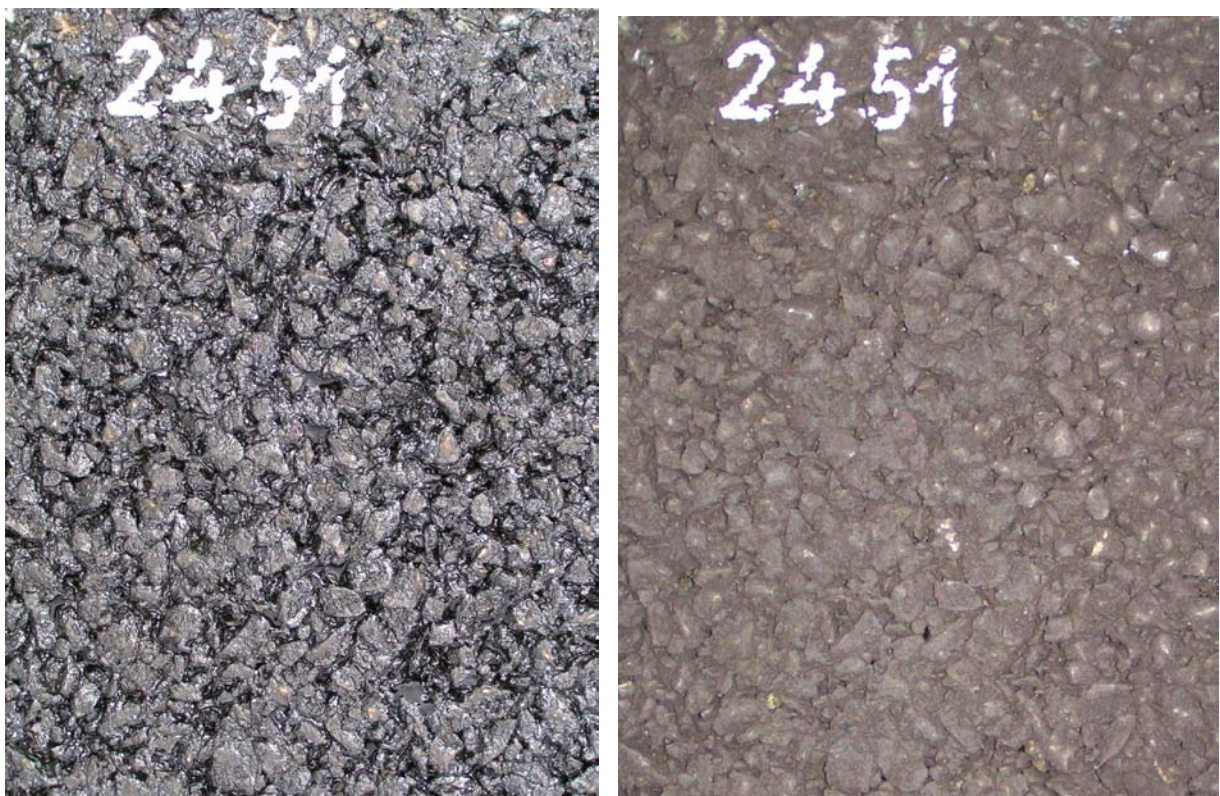


Abbildung 60: Platten der Variante 25% Epoxy vor (links) und nach (rechts) der Bewitterung

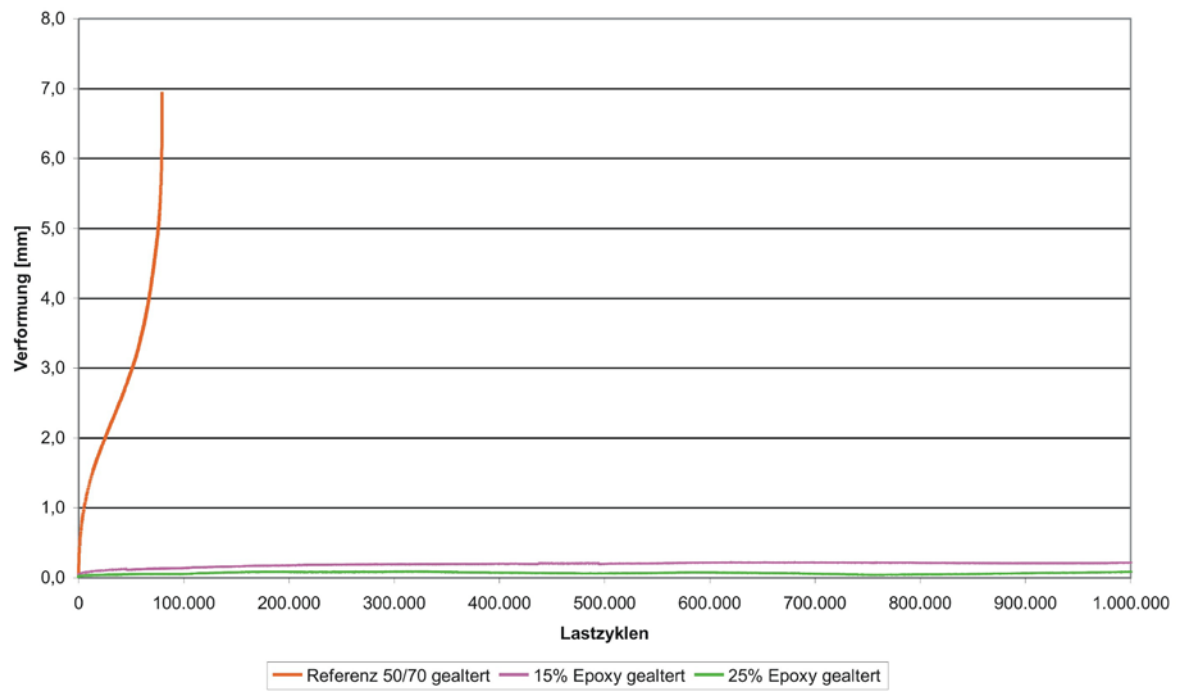


Abbildung 61: Dreipunkt-Biegeversuche an Probekörpern nach einer Bewitterung

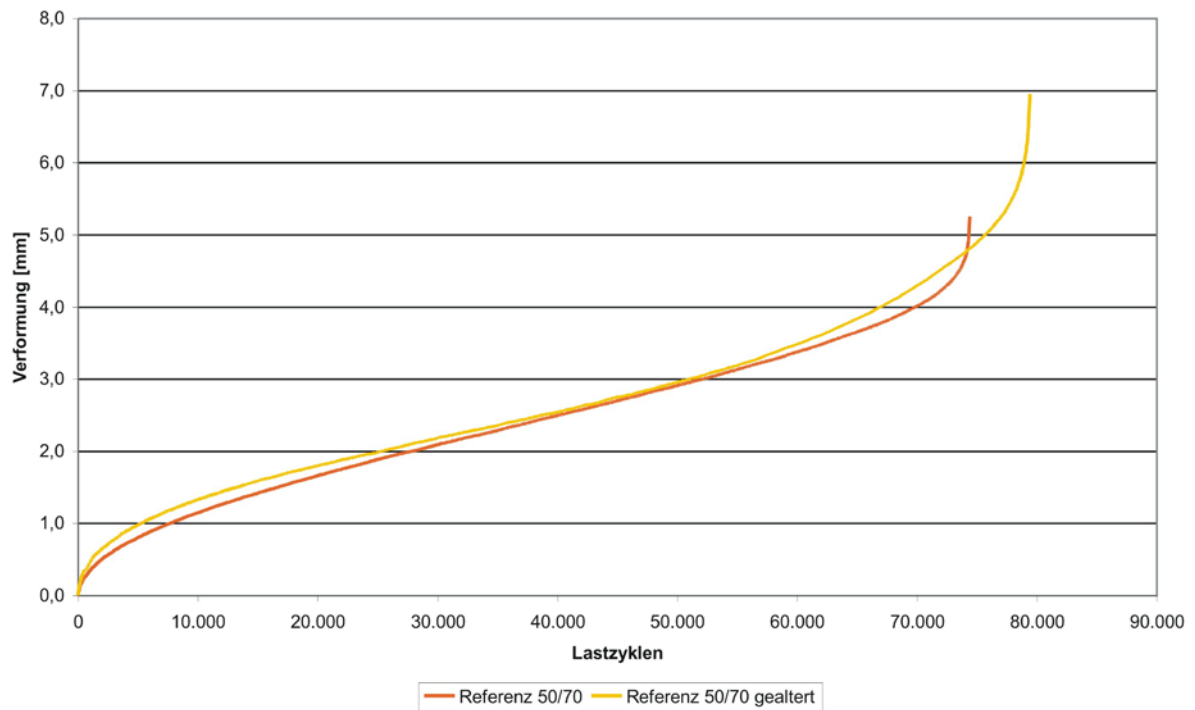


Abbildung 62: Vergleich von bewitterten und nicht bewitterten Probekörpern bei Referenz 50/70

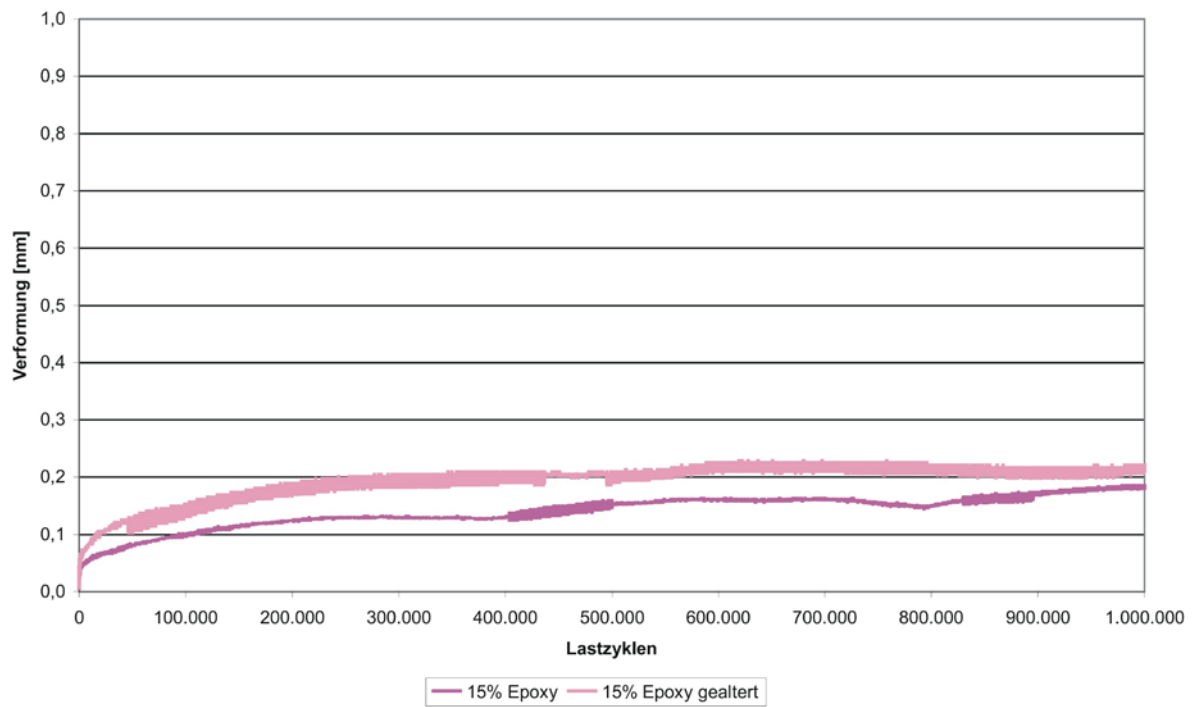


Abbildung 63: Vergleich von bewitterten und nicht bewitterten Probekörpern bei 15% Epoxy

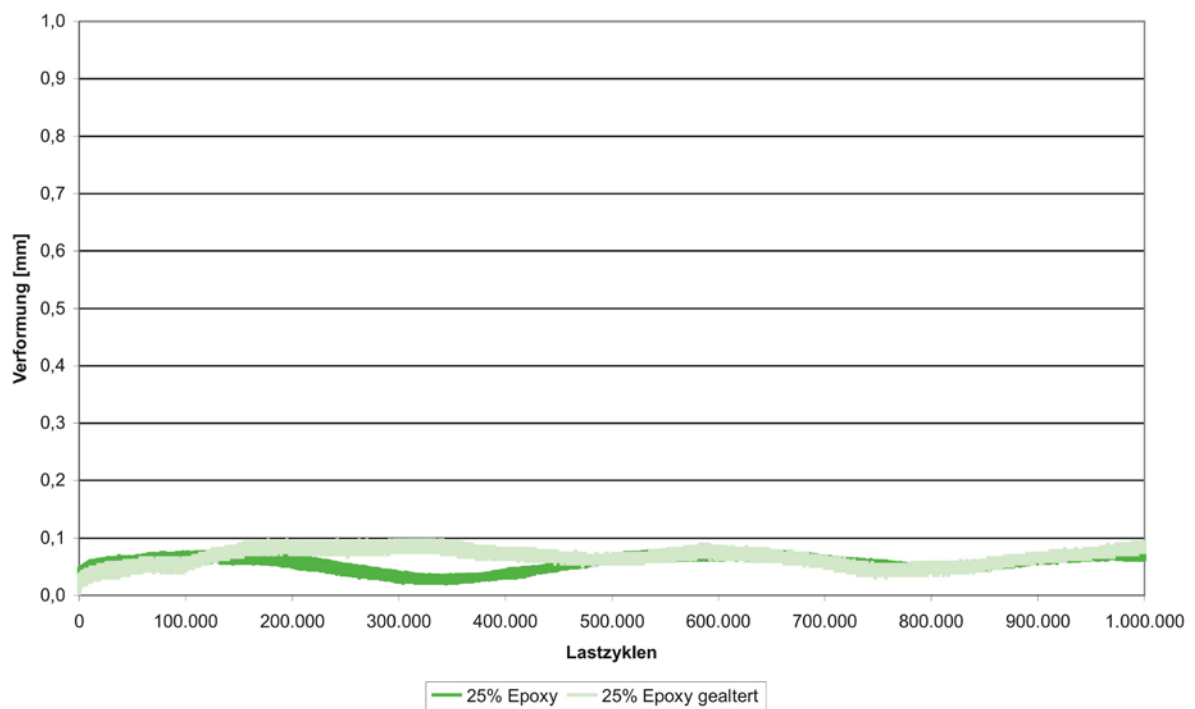


Abbildung 64: Vergleich von bewitterten und nicht bewitterten Probekörpern bei 25% Epoxy

Der Vergleich von bewitterten und nicht bewitterten Probekörpern zeigt, dass die zehnmönatige Bewitterung der Asphaltplatten keinen Einfluss auf das Verhalten im Dreipunkt-Biegeversuch hatte. Sowohl bei der Variante Referenz 50/70 als auch bei beiden Epoxy Varianten stimmen die Verläufe der Verformungen nahezu überein. Somit ist festzustellen, dass sich die Eigenschaften des Epoxydharzes im Asphalt durch eine klimatische Beanspruchung mutmaßlich nicht negativ verändern.

10.4 Griffigkeitsentwicklung unter Verkehr

Im Zuge der Hauptuntersuchungen wurden wesentliche Eigenschaften des Epoxy Asphaltes überprüft, die in erster Linie auf die Beurteilung der Dauerhaftigkeit und der Verformungsbeständigkeit abzielten. Bisher unbeantwortet ist die Frage nach der Griffigkeit einer Fahrbahnoberfläche aus Epoxy Asphalt und deren Entwicklung unter einer Verkehrsbelastung.

Um auch diese Gebrauchseigenschaft ansatzweise beurteilen zu können, wurden Platten aus Epoxy Asphalt (Variante 15% Epoxy) und aus Mischgut der Variante Referenz PmB in der Rundlaufprüfanlage (RPA) der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) einer simulierten Verkehrsbelastung ausgesetzt, um die Veränderung der Oberfläche während der Überrollungen bewerten zu können.

Die RPA der BASt dient in erster Linie zur Prüfung von Fahrbahnmarkierungsstoffen. Es handelt sich dabei um eine Sonderkonstruktion, auf der nach längerer Entwicklungs- und Erprobungszeit erstmals im Jahre 1989 Eignungsprüfungen für Markierungsstoffe vorgenommen wurden.

Im Wesentlichen besteht die RPA aus einer horizontal angeordneten Drehscheibe mit einem Durchmesser von 6,40 m, die mit bis zu 20 unterschiedlichen Probemarkierungen gleichzeitig bestückt werden kann (vgl. Abb. 65 und 66). Die Probemarkierungen werden mit bis zu acht Prüfrädern belastet, die den gleichen Verschleiß erzeugen wie reale Kraftfahrzeuge im Verkehr.

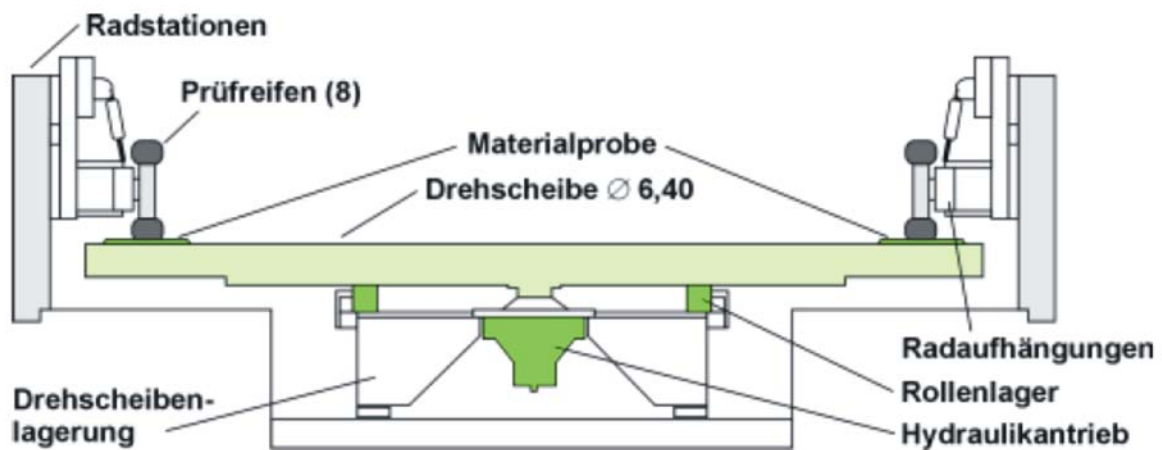


Abbildung 65: Prinzipskizze der Rundlaufprüfanlage der BAST



Abbildung 66: Rundlaufprüfanlage der BAST (Fotomontage)

Die RPA erlaubt es, die jährliche Belastung von Fahrbahnmarkierungen innerhalb einer Woche zu simulieren. Die Prüfdauer richtet sich nach dem für das jeweilige Markierungssystem vorgesehenen späteren Einsatzzweck. So werden Markierungssysteme für den kurzzeitigen vorübergehenden Einsatz nur 100.000 mal überrollt und solche für den dauerhaften Einsatz bis zu vier Millionen mal; letztere Prüfbeanspruchung lässt eine Funktionsdauer der Markierung von vier bis sechs Jahren erwarten.

Die technischen Daten der RPA lauten:

Klimatisiertes Messlabor:	8 m x 14 m
Klimatisierter Prüfraum:	7,50 m x 8,50 m
Durchmesser der Drehscheibe:	6,40 m
Gewicht der Drehscheibe:	ca. 15 t
Prüfgeschwindigkeit:	0 km/h bis 120 km/h stufenlos regelbar
Antrieb:	Elektro-hydraulisch, 75 kW
Prüfräder:	4 oder 8
Radlast:	3.000 N
Prüftemperatur:	von – 10 °C bis 50 °C stufenlos regelbar
Relative Luftfeuchte:	von 40 % bis 90 % stufenlos regelbar
Klimatisierung:	2 wechselseitig einsetzbare Klimaanlage mit je 45 kW Leistung und 12.000 m³/h Luftdurchsatz

Für die Prüfung der Griffigkeitsentwicklung der Epoxy Platten wurden die Standardprüfbedingungen für Markierungsstoffe gewählt, dass heißt eine Geschwindigkeit von 60 km/h bei einer Radlast von 3.000 N pro Reifen und einer maximalen Überrollungsanzahl von vier Millionen. Als Prüftemperatur wurden 20°C Raumtemperatur gewählt, dies führte zu einer Oberflächentemperatur während der Prüfung von etwa 25°C.

Die Probekörper in der RPA besitzen die Abmessungen 20 cm x 40 cm bei einer Höhe von 5,0 cm. Da mit dem Walzsektorverdichter im Asphaltlabor nur Platten mit den Abmessungen 26 cm x 32 cm hergestellt werden können, mussten die WSV-Platten noch nachbearbeitet werden. Hierzu wurden zunächst an den Längsseiten jeweils drei Zentimeter entfernt, um die Soll-Breite von 20,0 cm zu erhalten. Anschließend wurden in die Stirnseiten jeweils zwei Löcher gebohrt und in diese Schlüsselschrauben bis zur Hälfte ihrer Länge hineingedreht (vgl. Abb. 67).

Die fehlenden acht Zentimeter in der Länge wurden anschließend in einer Form mit Asphaltmastix ausgefüllt (jeweils vier Zentimeter an jedem Ende). Die eingesetzten Schrauben dienten in dem Fall zur Verankerung der Platte mit dem Füllmaterial (vgl. Abb. 68).



Abbildung 67: WSV-Platte mit beschnittenen Längsseiten und eingesetzten Schrauben



Abbildung 68: fertiger Probekörper für die Prüfung in der RPA

Die Probekörper werden mit der Längsseite orthogonal zur Rollrichtung in die RPA eingelegt und mit zwei Klemmen an den Enden fixiert (vgl. Abb. 69). Somit liegt die Rollspur in der Mitte der Platte aus dem Walzsektorverdichtungsgerät.

Zur Beurteilung der Veränderung der Oberflächentextur wurden SRT-Pendelmessungen gemäß TP Griff-StB (SRT) [15] durchgeführt. Die somit gemessene Mikrorauheit wurde hier als Vergleichskriterium herangezogen, da sie neben der Makro-Rauheit, der Dicke des Wasserfilms auf der Fahrbahn, dem Zustand des Reifens sowie der Fahrgeschwindigkeit das Griffigniveau einer Fahrbahnoberfläche bestimmt.

Die RPA wurde jeweils nach 10.000, 100.000, 200.000, 500.000, 1 Mio., 2 Mio., 3 Mio. und 4 Mio. Überrollungen angehalten und die SRT-Werte gemessen. Ausflussmessungen waren aus zeitlichen Gründen nicht möglich.

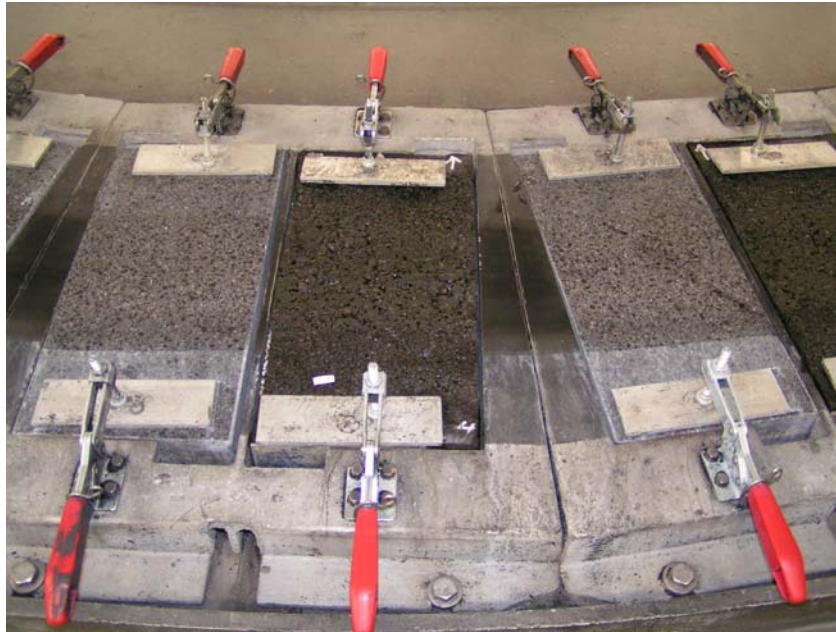


Abbildung 69: Probekörper in der RPA

Die Ergebnisse der Pendelmessungen sind in der Tabelle 19 und deren Verlauf über die Belastungsdauer in der Abbildung 70 dargestellt.

Tabelle 19: SRT-Einheiten der Probekörper während der Prüfung in der RPA

Überrollungen	SRT-Einheiten					
	Referenz PmB			15% Epoxy		
	2927	2928	Mittelwert	2922	2923	Mittelwert
0	85	75	80	70	68	69
10.000	59	56	58	57	56	57
100.000	60	57	59	56	55	56
200.000	57	57	57	54	52	53
500.000	57	55	56	54	52	53
1.000.000	57	54	56	53	51	52
2.000.000	56	53	55	51	50	51
3.000.000	54	51	53	50	50	50
4.000.000	56	51	54	51	50	51

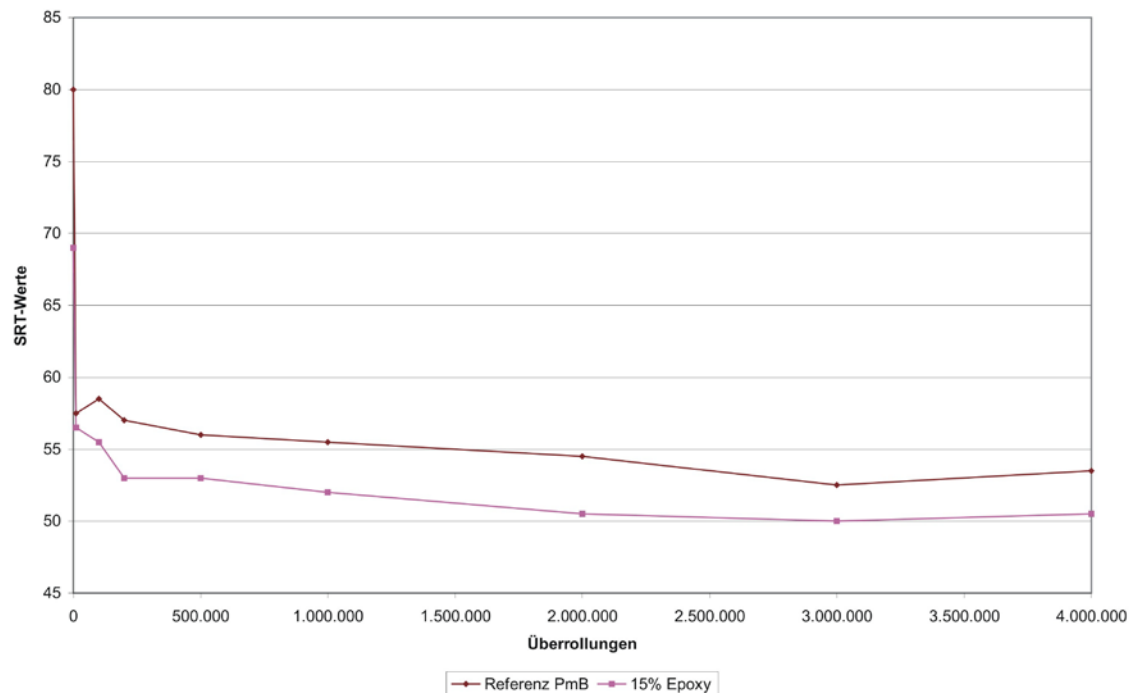


Abbildung 70: SRT-Einheiten in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen

Die SRT-Einheiten vor Beginn der Überrollungen waren bei den beiden Varianten mit einem Mittelwert von 80 bzw. 69 relativ unterschiedlich. Diese Differenz war jedoch bereits nach den ersten 10.000 Überrollungen nicht mehr messbar und das Griffigkeitsniveau mit 58 bzw. 57 SRT-Einheiten zwar nahezu gleich, aber deutlich geringer als der jeweilige Ursprungswert.

Nach 100.000 Überrollungen konnte bei der Variante Referenz PmB eine geringe Zunahme der Rauheit gemessen werden, um anschließend nach 200.000 Überrollungen auf einen Wert von 57 SRT-Einheiten zu sinken. Die Rauheit der Epoxy Platten wurde konstant geringer und betrug nach 200.000 Überrollungen 53 SRT-Einheiten.

Von diesem Zeitpunkt an entwickelte sich die Rauheit beider Varianten bis zum Versuchsende nach 4 Mio. Überrollungen nahezu parallel. Hierbei lag die Epoxy Variante stets um drei bis vier SRT-Einheiten unter der Variante mit Polymermodifiziertem Bitumen. Der Endwert der Variante 15% Epoxy betrug 51 und bei der Variante Referenz PmB 54 SRT-Einheiten.

Die SRT-Messungen haben gezeigt, dass die Mikrorauheit des Epoxy Asphaltes unter einer simulierten Verkehrsbelastung etwas geringer als bei einem konventionellen Asphalt ist. Im Gegensatz zu den SRT-Messungen vermitteln die Oberflächenbilder der beiden Varianten jedoch zunächst einen anderen Eindruck (vgl. Abb. 71 und 72).

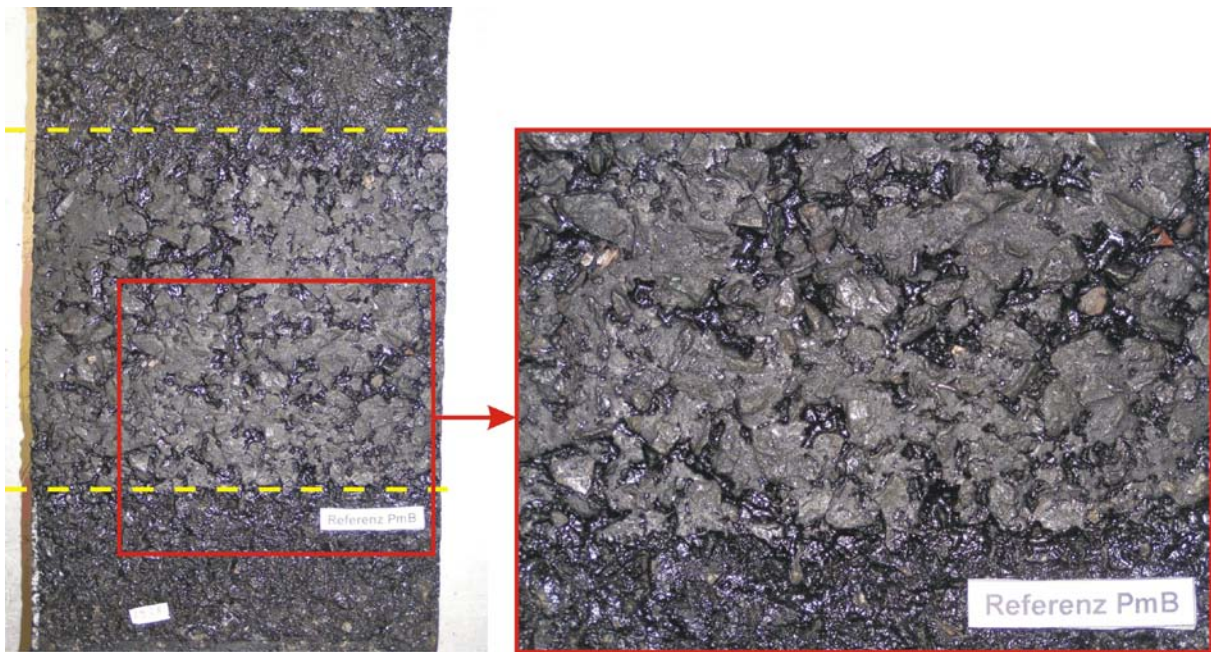


Abbildung 71: Oberflächen der Platten der Variante Referenz PmB nach 4 Mio. Überrollungen

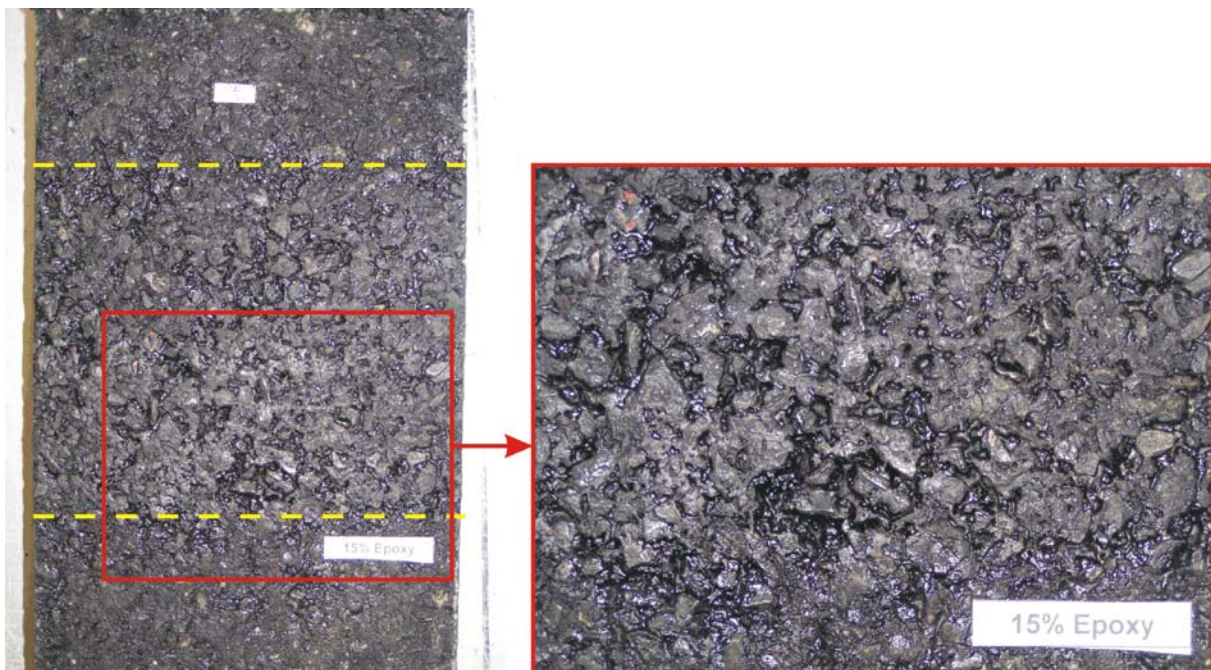


Abbildung 72: Oberflächen der Epoxy-Platten nach 4 Mio. Überrollungen

Auf der Platte aus dem Referenzmischgut ist der überrollte Bereich sehr deutlich zu erkennen. Die nach der Plattenherstellung noch vorhandenen Mörtel- und Bindemittelspitzen sind völlig abgefahren. Die oberflächennahen Gesteinskörner wurden durch die Last des überrollenden Rades in den Mörtel gedrückt und/oder das Bitumen an die Oberfläche gezogen. Auf diese Weise haben sich relativ großflächige Plateaus gebildet, die zunächst einen vergleichsweise „glatten“ Eindruck erwecken.

Im Vergleich dazu ist auf der Platte aus Epoxy Asphalt die Rollspur zwar ebenfalls zu erkennen, allerdings ist die Oberflächentextur des Asphaltes wesentlich besser erhalten geblieben. Auch hier wurden die Spitzen zwar durch die Überrollungen entfernt, eine Verdrückung der Gesteinskörner bzw. eine Bindemittelanreicherung an der Oberfläche wie bei der Variante Referenz PmB hat hier jedoch nur kaum stattgefunden.

Somit war festzustellen, dass die Oberflächenbilder zunächst eine bessere Griffigkeit des Epoxy Asphaltes vermuten ließen, die SRT-Messungen jedoch für die Platte aus Referenzmischgut eine um drei SRT-Einheiten bessere Rauigkeit auswiesen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass zusammenhängende ebene Bereiche an der Oberfläche des Asphaltes eine größere Verzögerung des Pendels verursachen. Da die Textur bei den Epoxy-Platten jedoch noch besser erhalten ist und das Pendel somit eine geringere Reibung erfährt, fallen auch die SRT-Werte um drei bis vier Einheiten geringer aus. Dies muss jedoch nicht zwangsläufig eine schlechtere Griffigkeit zur Folge haben. Hier sind detailliertere Untersuchungen erforderlich, um die tatsächliche Griffigkeitsentwicklung beurteilen zu können.

10.5 Widerstand gegen Dauerbelastung bei tiefen Temperaturen

Die Überprüfung des Kälteverhaltens mit standardisierten Verfahren (Kombination aus Abkühlversuchen und einaxialen Zugversuchen, vgl. Anhang 1) ließ keine Beurteilung des Epoxy Asphaltes zu. Da es sich hierbei jedoch um eine wichtige Kenngröße handelt, wurde versucht, diese mit einem alternativen Prüfverfahren anzusprechen.

Schäden an Asphaltdeckschichten aufgrund von Frosteinwirkung treten im Regelfall in Form von Rissen auf. Aus diesem Grund sollten die alternativen Kälteversuche auf eine eventuelle Rissempfindlichkeit des Epoxy Asphaltes abzielen. Als Ausgangspunkt hierfür diente der (englische) Entwurf einer europäischen Prüfnorm für Heißasphalt: prEN 12697-44, „Test methods for hot mix asphalt – Part 44: Crack Propagation by Semi-Circular Bending Test“ [16].

Hierin wird ein Verfahren beschrieben, dass zur Bestimmung der Zugfestigkeit im Hinblick auf eine Beurteilung der Rissbildung dienen soll.

Für die Ansprache des Widerstandes gegen eine Dauerbelastung bei tiefen Temperaturen von Epoxy Asphalt wurden die Prüfbedingungen der EN jedoch modifiziert. So handelt es sich ursprünglich um ein rein statisches Verfahren, bei der die Probekörper bei kontinuierlichem Vorschub bis zum Bruch belastet werden. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen wurde jedoch eine dynamische Belastung gewählt, wie sie bereits bei der Bestimmung des Ermüdungswiderstands mittels dynamischem 3-Punkt-Biegeversuch angewendet wurde (vgl. Anhang 1). Grund hierfür war die angestrebte Dauerbelastung des Asphaltes über einen längeren Zeitraum.

Die Probekörperform gemäß EN wurde grundsätzlich beibehalten. Lediglich die Abmessungen (vgl. Abb. 73) wurden auf die hier vorliegenden Bedürfnisse abgewandelt.

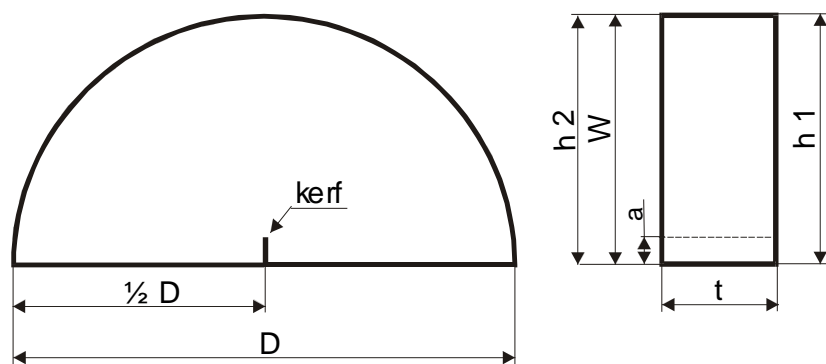


Abbildung 73: Probekörperform für eine Dauerbelastung bei tiefen Temperaturen

Die Probekörperherstellung begann mit der Herstellung von WSV-Platten, aus denen anschließend zwei Bohrkerne mit einem Durchmesser von 150 mm entnommen wurden. Diese wurden mit Hilfe einer Säge halbiert und die Hälften jeweils an der Unterseite mittig und senkrecht zur Schnittfläche geschlitzt.

Folglich ergeben sich die Abmessungen der Probekörper zu:

$$D = 150 \text{ mm}$$

$$h = 75 \text{ mm}$$

$$t = 40 \text{ mm}$$

$$a = 15 \text{ mm}$$

Als Dicke t der Probekörper sind laut EN 50 mm vorgesehen, hier wurden jedoch 40 mm gewählt, um die übliche Dicke für Asphaltdeckschichten für die Prüfung des Widerstandes gegen eine dauerhafte Belastung bei tiefen Temperaturen anzusetzen.

Der Schlitz an der Unterseite des Probekörpers diene als Vorgabe einer „Soll-Rissstelle“ und sollte eine in der Realität möglicherweise bereits bestehende Schädigung der Asphaltdeckschicht vor Beginn einer Frostperiode simulieren. Nach EN sollte die Schlitztiefe 10 mm betragen, es wurden hier jedoch 15 mm gewählt, da Vorversuche gezeigt hatten, dass mit diesem Wert eine praktikablere Versuchsdauer und eine bessere Differenzierbarkeit der Ergebnisse erreicht werden konnte.

In einem letzten Schritt der Probekörpervorbereitung wurde die Mantelfläche an dessen Scheitelpunkt geringfügig geschliffen, um eine etwa 0,5 bis 1,0 cm breite, ebene und zur Unterseite planparallele Fläche zu erhalten (vgl. Abb. 74). Dies war erforderlich, um für die Versuchsdurchführung eine vollflächige Auflagerung der Schwerter und damit eine über die Dicke t gleichmäßige Lasteinleitung in den Probekörper zu gewährleisten (vgl. Abb. 75).



Abbildung 74: Probekörper für die Versuche zur Dauerbelastung bei tiefen Temperaturen



Abbildung 75: Prüfvorrichtung für die Versuche zur Dauerbelastung bei tiefen Temperaturen

Analog zu den im Zuge der Bestimmung des Ermüdungswiderstandes angewendeten 3-Punkt-Biegeversuchen erfolgte die Steuerung der Belastung für die Überprüfung des Widerstandes gegen eine Dauerbelastung bei tiefen Temperaturen ebenfalls kraftgeregelt. Bei jedem Lastwechsel wurde der Probekörper bis zu einer maximalen Oberlast beansprucht und die dadurch hervorgerufene Verformung kontinuierlich aufgezeichnet.

Die Prüfparameter wurden in mehreren Tastversuchen ermittelt und ergaben sich zu:

- sinusförmige Belastungskurve
- Belastungsfrequenz: 5 Hz
- Oberlast: 2,0 kN
- Unterlast: 0,03 kN

Ausschlaggebend für diese Vorgehensweise war, dass bei einem ungeschädigten Probekörperquerschnitt die aufgebrachte Last so lange zu ertragen sein müsste, bis dieser eine erste

Schädigung erleidet (z. B. in Form eines Risses). Somit wird als Bewertungskriterium die Anzahl der Lastwechsel herangezogen, bei der ein Versagen des Probekörpers an der Soll-Rissstelle in Form eines Bruches zu verzeichnen ist (Bruchlastwechselzahl).

Die Überprüfung des Widerstandes gegen eine dauerhafte Belastung entsprechend dem zuvor beschriebenen Vorgehen erfolgte bei drei unterschiedlichen Temperaturen: +5°C, -5°C, -15°C. Diese Temperaturspanne wurde gewählt, da hier das Maximum der Zugfestigkeit des Asphaltes zu erwarten war.

Die Variante Referenz PmB wurde hier nicht betrachtet, da im Zuge der Bestimmung des Widerstandes gegen eine dauerhafte Belastung bei tiefen Temperaturen nur überprüft werden sollte, ob die Verwendung des Epoxydharzes für diese Eigenschaft Nachteile mit sich bringt.

Die Abbildungen 76 bis 78 zeigen die Entwicklung der vertikalen Verformungen über die Versuchsdauer und die Abbildung 79 die Anzahl der Belastungen bis zum Bruch des Probekörpers für die geprüften Varianten bei den jeweiligen Prüftemperaturen. In allen Fällen handelt es sich jeweils um den Mittelwert aus drei Einzelprüfungen. Die Ergebnisse der Einzelprüfungen können dem Anhang 7 entnommen werden.

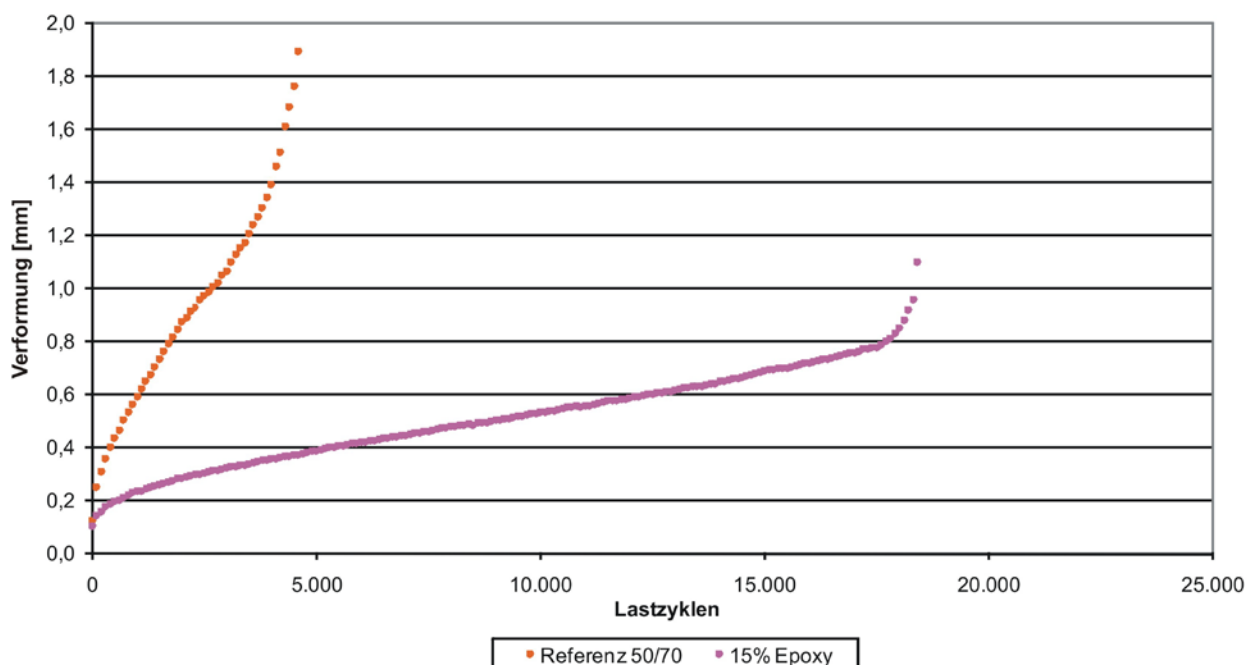


Abbildung 76: Ergebnisse der dynamischen Dauerbelastung bei +5°C

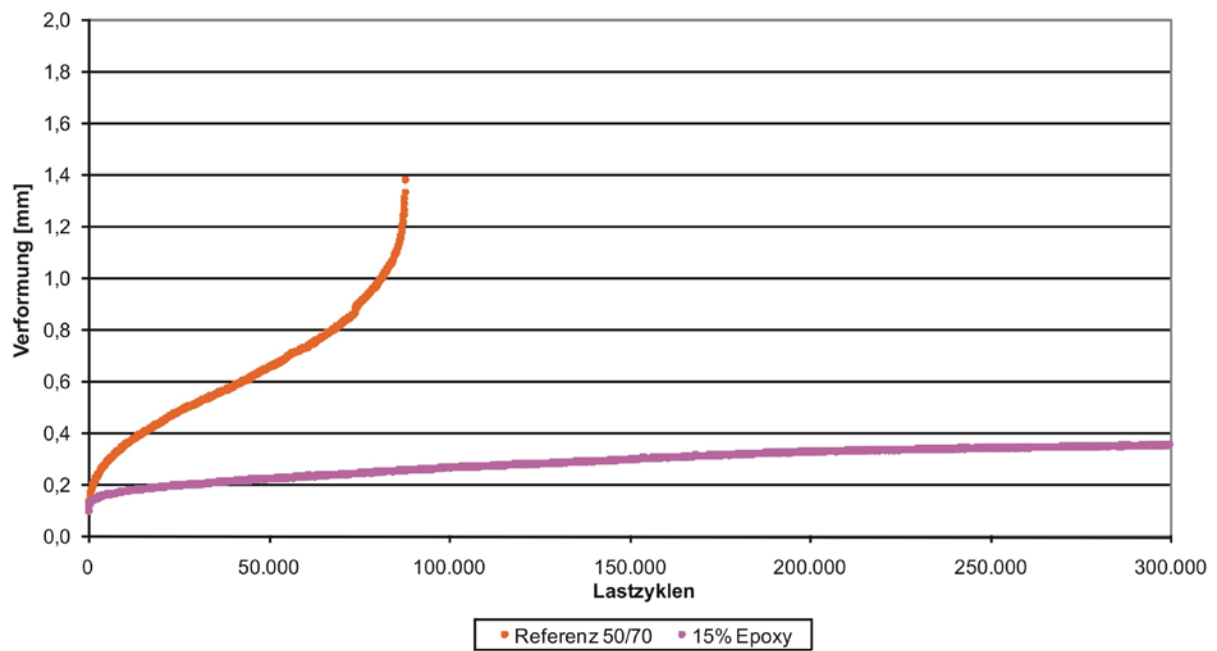


Abbildung 77: Ergebnisse der dynamischen Dauerbelastung bei -5°C

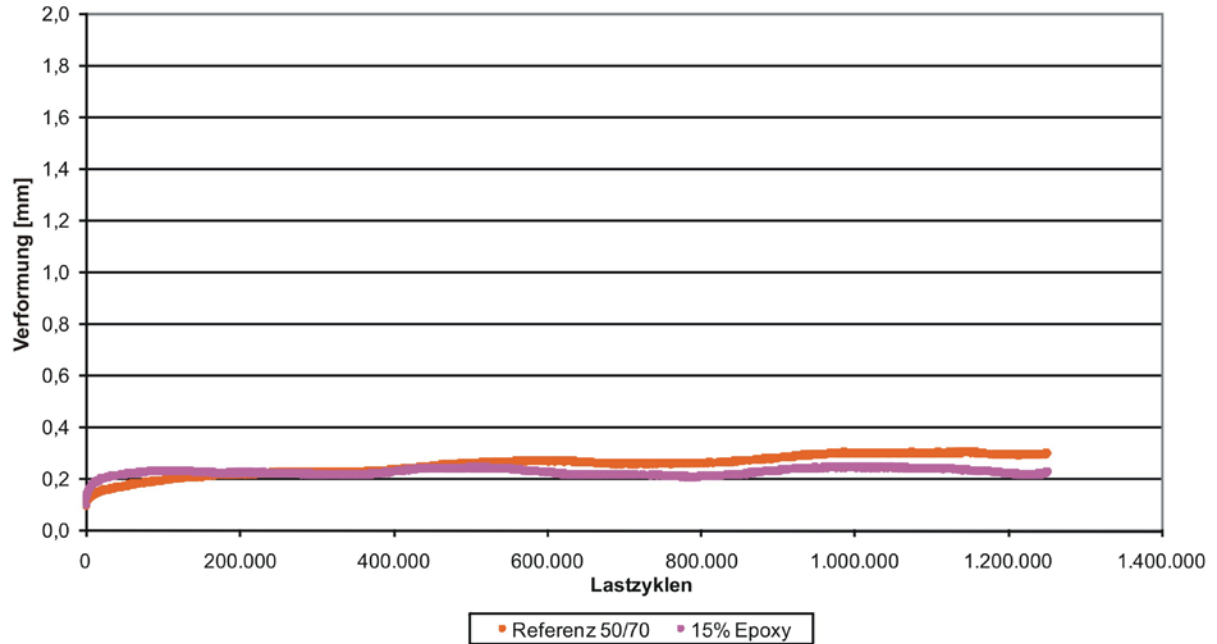


Abbildung 78: Ergebnisse der dynamischen Dauerbelastung bei -15°C

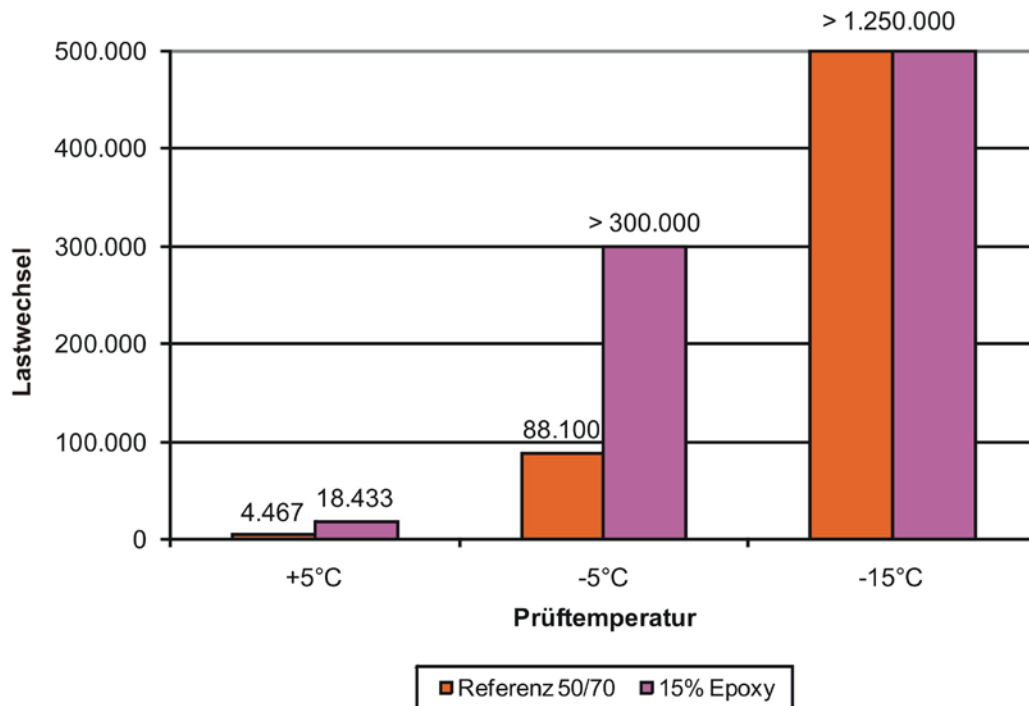


Abbildung 79: Bruchlastwechselzahlen bei der dynamischen Dauerbelastung

Betrachtet man die Ergebnisse der Kälteversuche bei einer Temperatur von +5°C, so stellt man fest, dass die Variante 15% Epoxy mit einer Bruchlastwechselzahl von über 18.000 ein günstigeres Verhalten aufweist als die Variante Referenz 50/70 mit etwa 4.400 Lastwechseln. Die maximal ertragbare Verformung bis zum Bruch des Probekörpers betrug etwa 1,0 mm bei der Variante Referenz 50/70 bzw. etwa 0,8 mm bei der Variante 15% Epoxy. Zu begründen ist dieses Ergebnis durch die Wirkung des Epoxydharzes im Asphalt.

Bei einer Prüftemperatur von -5°C kam es bei der Variante ohne Epoxydharz nach ca. 88.000 Belastungen zum Bruch des Probekörpers, wohingegen der Probekörper aus Epoxy Asphalt auch nach 300.000 Belastungen noch keine Anzeichen eines Versagens zeigte und somit einen deutlich höheren Widerstand gegen eine dauerhafte Belastung bei dieser Temperatur besitzt.

Die Prüfungen bei einer Temperatur von -15°C ergaben für beide Varianten ein ähnliches Ergebnis. Auch bei einer Belastungsdauer von mehr als 1,2 Mio. Lastwechseln konnte kein Versagen des Probekörpers festgestellt werden und der Verlauf der Verformungen lag bei beiden Varianten auf nahezu gleichem Niveau von 0,2 bis 0,3 mm.

Zusammenfassend ist somit festzustellen, dass die Verwendung von Epoxydharz im Asphaltmischgut hinsichtlich einer Dauerbelastung bei tiefen Temperaturen keine Nachteile im Vergleich zu einem konventionellen Asphaltmischgut ohne Epoxydharz mit sich bringt. Im Bereich bis -5°C besitzt der Epoxy Asphalt sogar ein günstigeres Verhalten als die Variante Referenz 50/70. Bei einer Temperatur von -15°C kann der Widerstand gegen eine dauerhafte Belastung als mindestens gleichwertig bezeichnet werden, da hier während der Versuchsdauer kein Bruch des Probekörpers erreicht werden konnte.

10.6 Arbeits- und Umweltschutz

Der Arbeitsschutz bei der Herstellung und Verarbeitung von Epoxy Asphalt ist kritisch zu sehen, da bei der Mischgutherstellung im Laboratorium aufgrund der Dampfentwicklung eine Schutzausrüstung notwendig war. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass es sich bei dem verwendeten Epoxydharz um ein standardisiertes und nicht auf einen Einsatz im Heißasphalt abgestimmtes Produkt handelt. Eine Modifizierung des Epoxydharzes hat somit ebenfalls eine Reduzierung der Emissionen zu berücksichtigen.

Zu klären ist ferner die Entwicklung von Stäuben beim Fräsen von Deckschichten aus Epoxy Asphalt. Wie verhält sich das ausgehärtete Epoxydharz in diesem Fall? Auch hier ist der Arbeits- und Umweltschutz zu prüfen.

Eine endgültige Klärung des Arbeits- und Umweltschutzes ist für eine großmaßstäbliche Anwendung zwar zwingend erforderlich, jedoch nicht Gegenstand der hier durchgeführten Untersuchungen.

10.7 Voraussetzungen für Feldversuche

Vor einem ersten Einsatz von Epoxydharz in der Praxis sind neben den unter Abschnitt 10.6 aufgeführten Hinweisen zum Arbeits- und Umweltschutz einige weitere Details abzuarbeiten, die aus der Bearbeitung dieser Arbeit resultieren. Diese beinhalten im Wesentlichen die folgenden Aspekte:

- Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Epoxydharz ist ein Standardprodukt, welches nicht für einen Einsatz im Asphaltmischgut konzipiert wurde. Daher muss für ei-

ne großmaßstäbliche Anwendung ein System entwickelt werden, dass speziell für eine Verarbeitung im Heißmischgut optimiert ist. Hierzu zählt nicht zuletzt eine ausreichend lange Verarbeitungszeit, um den Transport des Mischgutes von der Mischanlage zur Baustelle sowie eine entsprechende Einbau- und Verdichtbarkeit zu gewährleisten.

- Die Zugabe des Epoxydharzes an der Mischanlage sollte analog zum Vorgehen im Labor erfolgen, d. h. zunächst die Zugabe des vorgemischten Harz-Härter-Systems in das zu verwendende Bitumen und anschließend die Dosierung des Gemisches zu den Gesteinskörnungen im Mischer. Auf diese Weise wird eine möglichst homogene Verteilung des Epoxydharzes im Bitumen und damit auch im Asphaltmischgut erreicht.
- Darüber hinaus ist zu überprüfen, ob bei dem in der Praxis zum Einsatz kommenden Epoxydharz die im Labor benötigte 30minütige Temperierphase erforderlich ist. Sollte dies der Fall sein, dann ist zu klären, wie dies in die Praxis umgesetzt werden kann. Idealerweise sollte hier die Zeit des Transportes des Mischgutes zur Baustelle genutzt werden. In diesem Fall wären allerdings Transportfahrzeuge mit Thermo-Kübel erforderlich, um die Temperatur des Mischgutes konstant zu halten.
- Nicht zuletzt durch die Einführung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (KrW/AbfG) wird der Vermeidung von Abfall und damit dem Recycling bzw. der Wiederverwendung von gebrauchten Baustoffen eine erhöhte Bedeutung beigemessen. Daher ist auch im Falle des Epoxy Asphaltes die Frage der Wiederverwendung von Asphaltdeckschichten mit Epoxydharz zu untersuchen.
- Die Untersuchungen zur Extrahierbarkeit haben gezeigt, dass eine Aufschmelzung des Mischgutes durchaus möglich ist. Inwiefern die Wiederverwendung von solchem Granulat in neuem Mischgut möglich ist, bedarf weiterer Forschung. Hierzu wären Labormischungen aus frischen Baustoffen unter Zugabe von Granulat aus Epoxy Asphalt herzustellen und dessen Eignung nachzuweisen. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf eine Wirksamkeit des Epoxydharzes im späteren Asphaltmischgut.

Ein erstes Gespräch mit einem Epoxydharzhersteller brachte die Erkenntnis, dass eine Modifizierung bereits existierender Epoxydharzsysteme bzw. die Konzeption eines neuen Systems unter Berücksichtigung der zuvor aufgeführten Anforderungen möglich ist.

Ein Vergleich der Kosten einer Bauweise mit konventionellem Asphalt und einer mit Epoxy Asphalt wurde noch nicht angestellt. Hier gilt es neben den Kosten für die Baustoffe auch die Kosten des aufwendigeren Mischanlagenbetriebes sowie des erhöhten logistischen Aufwandes während des Einbaus zu berücksichtigen. Anschließend sind die Kosten, die aufgrund der wesentlich längeren Lebensdauer der Deckschicht und somit der geringeren Unterhaltungs- und vor allem Erhaltungsmaßnahmen eingespart werden können, den mutmaßlich höheren Herstellungskosten gegenüberzustellen. Hinzu kommt der geringere volkswirtschaftliche Schaden, der aufgrund von weniger Baustelleneinrichtungen für die Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen und damit der Vermeidung von Verkehrsstaus erzielt werden kann.

IV.

Theoretische Beschreibung des Verformungsverhaltens

11 Modelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalt

In [33] wurden bereits Modelle zur analytischen Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalt erläutert, um mit ihnen ein Finite-Elemente-Programm zu kalibrieren. Diese Modelle sowie deren Verformungsverhalten werden im Folgenden zusammengefasst wiedergegeben.

11.1 Elemente rheologischer Modelle

Rheologie beschreibt, wie sich ein Körper bei Beanspruchung durch äußere Einwirkungen verformt. Körper können Festkörper, Flüssigkeiten oder Gase sein. Ein rheologisches Modell beschreibt also die Verformungseigenschaften eines Materials. Die Rheologie selbst ist Teil der Mechanik. Rheologische Modelle beinhalten Elemente, z.B. Feder, Dämpfer und Reibungselemente. Diese Elemente beschreiben meist nur einen Teil des realen Verformungsverhaltens von Asphalt. In Reihen- oder Parallelschaltung sind die Eigenschaften der Elemente kombinierbar und bieten somit die Möglichkeit komplexe Verformungsverhalten darzustellen.

Im Folgenden wird das Verformungsverhalten ausgewählter Elemente eines rheologischen Modells näher erläutert.

11.1.1 Linear-elastische Verformung – lineare Feder

Eine linear-elastische Verformung wird durch eine als masselos angenommene Feder beschrieben. Die Feder folgt dem Hook'schen Gesetz, welches den linearen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung festlegt. [34] Die Spannung an der Feder setzt sich somit aus dem Elastizitätsmodul E , dem Proportionalitätsfaktor und der Dehnung ε zusammen. Wie das Weg-Zeit-Diagramm (vgl. Abb. 80) zeigt, treten die Spannungen und Dehnungen bei einer Feder zeitunabhängig auf. (vgl. [35], S.14) Je höher der Elastizitätsmodul ist, desto geringer ist bei konstanter Spannung die mögliche Dehnung.

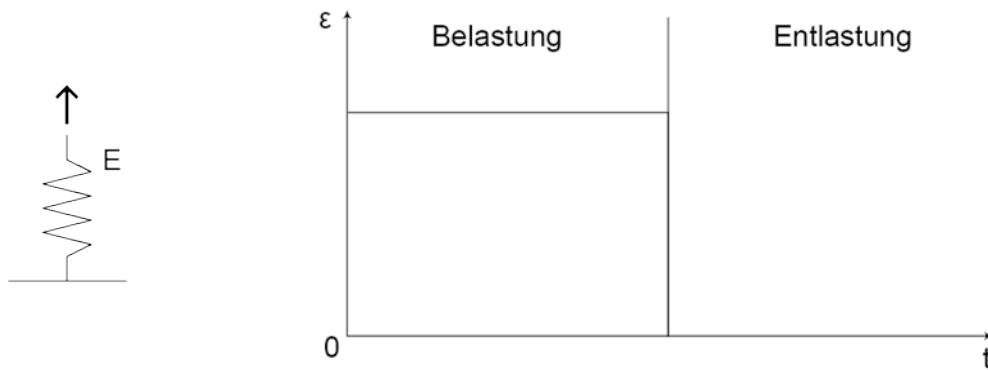


Abbildung 80: Symbol und Verformungsverhalten einer linearen Feder

11.1.2 Linear-viskose Verformung – linearer Dämpfer

Die linear-viskose Verformung wird mit Hilfe mechanischer Analogie als linearer, ebenfalls als masselos angenommener Dämpfer dargestellt. Nach Isaac Newton beschreibt sich die Linearität in einem Dämpfer durch den linearen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnungsgeschwindigkeit, d.h. der Ableitung der Dehnung nach der Zeit. Im Gegensatz zur Feder ist ein Dämpfer daher zeitabhängig (vgl. Abb. 81). Die Proportionalitätskonstante η wird als dynamische Viskosität (dynamische Viskosität ist abhängig von der Temperatur des Stoffes; Bsp. Asphalt, 20°C mit $\eta = 10^5$ [mPa•s]) bezeichnet. Je geringer diese ist, desto leichter und somit schneller verändert sich die Dehnung. Entstandene Verformungen sind irreversibel, treten aber wegen der Zeitabhängigkeit verzögert auf.

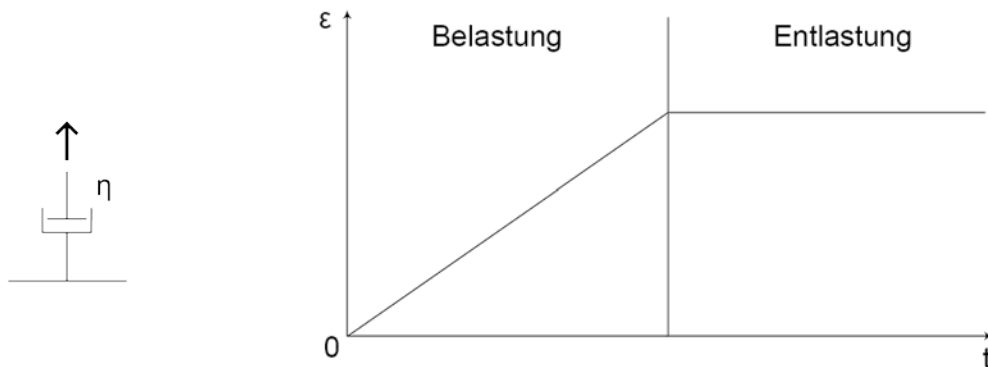


Abbildung 81: Symbol und Verformungsverhalten eines linearen Dämpfers

11.1.3 Nichtlinear-viskose Verformung – parabolischer Dämpfer

Der Unterschied zu einem linearen Dämpfer liegt in der Kriechnachgiebigkeit. Sie lässt sich mit einem weiteren materialbezogenen Parameter als nicht-linear beschreiben. Mit diesem Parameter ist es z.B. möglich die Temperatur einfließen zu lassen.

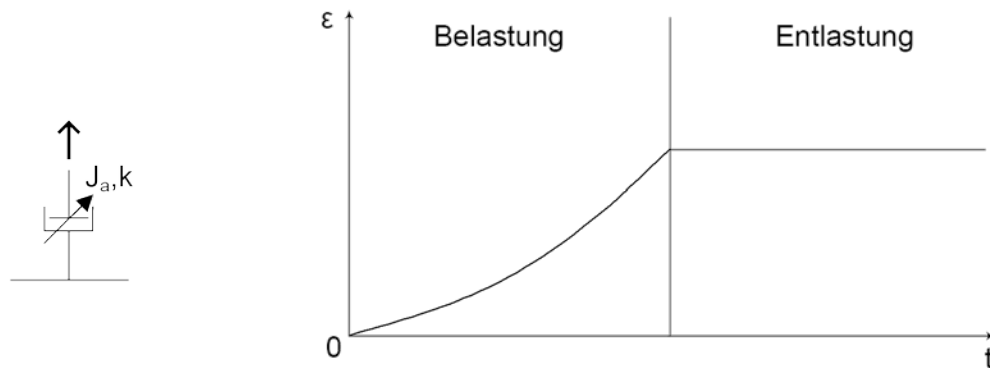


Abbildung 82: Symbol und Verformungsverhalten eines parabolischen Dämpfers

11.1.4 Plastische Verformung – St.-Venant-Element

„Plastisches Stoffverhalten wird in der Rheologie durch ein so genanntes St.-Venant-Element charakterisiert. Eine Verformung stellt sich erst nach dem Erreichen einer kritischen Schwellspannung“ ein. [36, S.19] Die entstandene Verformung tritt im Gegensatz zum Dämpfer hier sofort auf und ist irreversibel. [37]

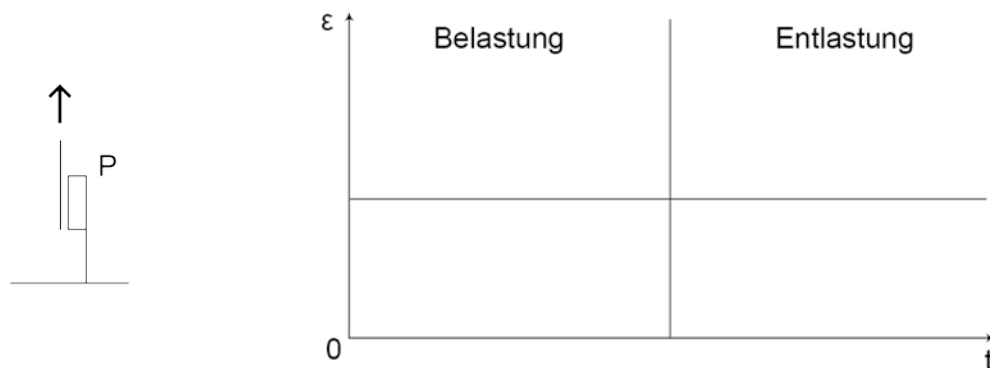


Abbildung 83: Symbol und Verformungsverhalten eines St.-Venant-Elementes

11.2 Linear rheologische Modelle

Im Folgenden werden zunächst die linear rheologischen Modelle beschrieben. Sie treten in den komplexeren Modellen zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalt in ihrer ursprünglichen oder in abgewandelter Form auf. Weiter wird an diesen Modellen die Eigenschaften einer Reihen- oder Parallelschaltung deutlich. Die verschiedenen Modelle sind abhängig von unterschiedlich vielen Parametern, z.B. Elastizitätsmodul und Viskosität. Die einzelnen Parameter lassen sich mit Hilfe von Versuchen an Probekörpern bestimmen. In der Regel werden diese Versuche mit einer konstanten Belastung durchgeführt, was zu statischen Parametern führt. In der Realität ist eine Belastung aber selten konstant, sie variiert. Die Konsequenz sind zyklisch-dynamische Versuche, bei denen die Last z.B. in Form einer Schwingung aufgebracht wird. [36, S.44] Ergebnis sind dann so genannte komplexe oder dynamische Parameter.

11.2.1 Maxwell Modell

Das Modell nach Maxwell (1832 - 1879) besteht aus einer linearen Feder und einem linearen Dämpfer in Reihe geschaltet. Das Material wird dadurch sowohl durch die elastischen Eigenschaften der Feder, als auch durch die viskosen Eigenschaften des Dämpfers beschrieben. Die Dehnungen der beiden Elemente addieren sich in der Reihenschaltung, wohingegen die Spannung des Systems, der Feder und des Dämpfers gleich sind.

Wird das System belastet, so tritt sofort eine Dehnung der Feder auf. Der Dämpfer verursacht abhängig von seiner Viskosität eine linear ansteigende Dehnung. Bei Entlastung geht die elastische Dehnung sofort zurück, der viskose Anteil bleibt erhalten. Das Relaxationsverhalten hängt von der Viskosität des Dämpfers ab, „je viskoser dieser reagiert, desto langsamer schreitet der Spannungsabbau voran“. [36, S.23] Die Spannung wird bei einer konstanten Dehnung asymptotisch gegen Null abgebaut.

Abschließend ist zu sagen, dass das Maxwell Modell den Rückgang der Dehnung mit dem sofortigen Dehnungsabfall nicht realistisch darstellt, stattdessen ist es geeignet das Relaxationsverhalten abzubilden. Dem Modell fehlt ein verzögerter Dehnungsrückgang.

Parameter:

Dynamische Viskosität η , Elastizitätsmodul E

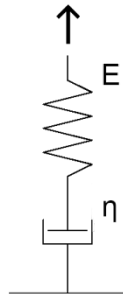


Abbildung 84: Modell von Maxwell

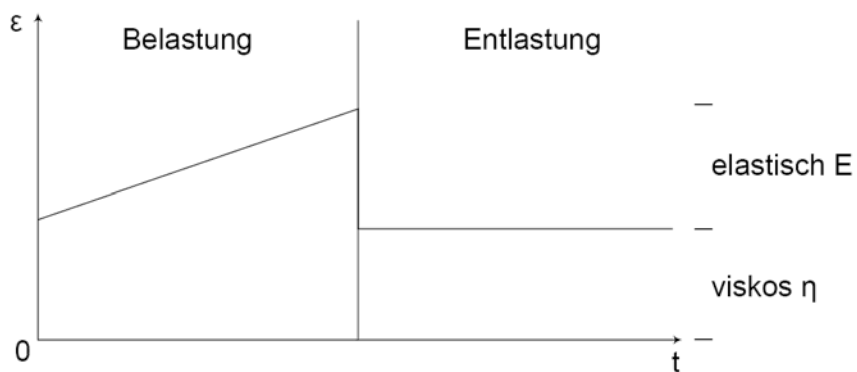


Abbildung 85: Verformungsverhalten des Maxwell Modells

11.2.2 Kelvin-Voigt Modell

Das Kelvin-Voigt Modell (Kelvin 1850 - 1907, Voigt 1850 - 1919) besteht wie das Maxwell Modell aus den gleichen Elementen, Feder und Dämpfer, hier jedoch parallel geschaltet. Es beschreibt ebenfalls ein elastisch-viskoses Verformungsverhalten. Auf Grund der parallelen Anordnung ergibt sich die Spannung im System additiv aus den Einzelspannungen der Feder und des Dämpfers. Die Dehnungen hingegen sind über das System gleich.

Bei einer Belastung des Systems kommt es durch den Dämpfer, der abhängig von der Viskosität die Belastung mit einem linearen Dehnungsverlauf aufnimmt, und der Annahme, dass die Dehnungen im System gleich sind, zu keiner sofortigen Dehnung. Umgekehrt kommt es bei einer Entlastung auch nicht zu einer sofortigen Abnahme der Dehnung. Die maximale Dehnung der Feder ist dabei die maximale Dehnung des Systems. Die Dehnung nimmt nach der Entlastung asymptotisch gegen Null wieder ab, es verbleiben keine plastischen Verformungen.

Festzuhalten ist, dass dieses Modell, stellvertretend für alle parallel geschalteten Modelle, keine Relaxationsfähigkeit aufzeigt, „da sich bei konstanter Dehnung eine konstante Spannung hält“. [38] Das Kriechverhalten, der Abbau der Dehnungen bei konstanter Spannung im Material, wird allerdings realitätsnah dargestellt. Eine Beschreibung des Relaxationsverhaltens ist mit diesem Modell nicht möglich.

Parameter:

Dynamische Viskosität η , Elastizitätsmodul E

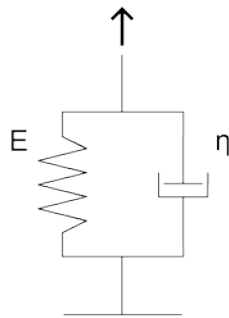


Abbildung 86:Modell von Kelvin-Voigt

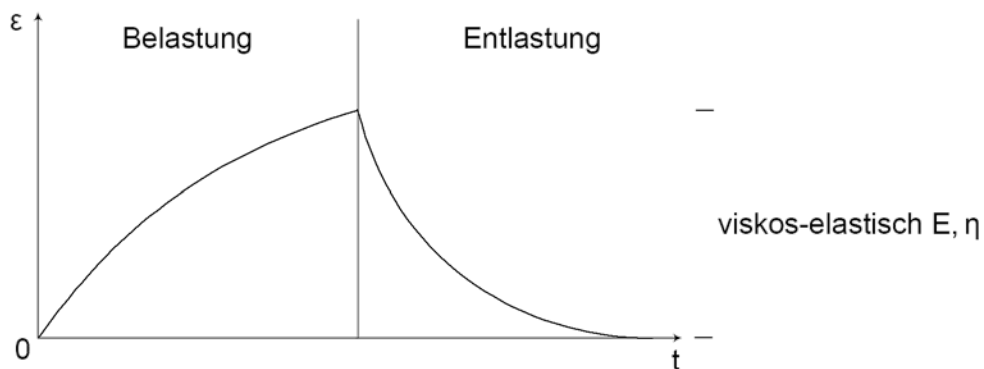


Abbildung 87: Verformungsverhalten des Kelvin-Voigt Modelles

11.2.3 Burgers Modell

Das Modell von M. Burgers (1895 - 1981) reiht die beiden beschriebenen Basismodelle, Maxwell und Kelvin-Voigt Modell, hintereinander. Mit diesem Modell ist es möglich die Verformung durch mehr Parameter näher an der Realität abzubilden.

Im Detail wird das Verformungsverhalten durch die einzelnen Elemente in mehreren Abschnitten beschrieben: Durch den Elastizitätsmodul E_1 wird eine sofortige Dehnung bei Belastung umgesetzt. Das Kelvin-Voigt Modell führt dann eine Krümmung der Dehnungskurve hervor, wobei die maximale Dehnung der Feder (E_2) gleich der dieses Modellteils ist. Verzögert kommt dann die viskose Dehnung (η_1) hinzu, die sich bis zur Entlastung mit einer konstanten Steigung abbildet. Die Rückverformung läuft analog ab, es bleibt jedoch eine dauerhafte Verformung auf Grund des Dämpfers mit der Viskosität η_1 bestehen.

Die Beschreibung des Relaxationsverhaltens wie auch des Kriechverhaltens ist mit dem Burgers Modell möglich, das in dem Maxwell und Kelvin-Voigt Modell zu einem Modell verbunden wird.

Parameter:

Dynamische Viskosität η_1 und η_2 , Elastizitätsmodul E_1 und E_2

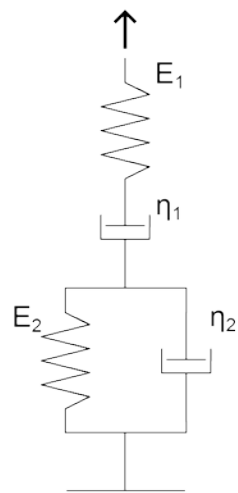


Abbildung 88: Burgers Modell

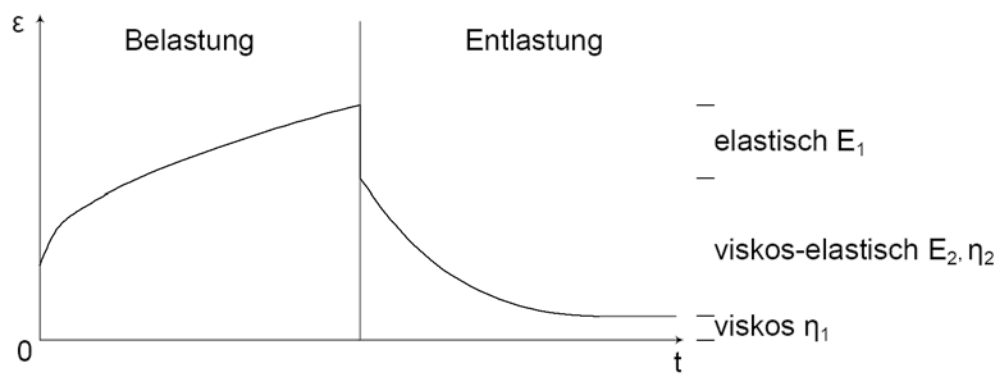


Abbildung 89: Verformungsverhalten des Burgers Modelles

11.3 Bestehende rheologische Modelle von Asphalt

11.3.1 Monismith Modell

An dieser Stelle sei kurz auf das Modell von Monismith und Secor hingewiesen. Es ist eine Abwandlung des Modells von Burgers, welches das Verformungsverhalten von Asphalt beschreibt.

Trotz umfangreicher Literaturrecherche war es nicht möglich näher Informationen über dieses Modell zu erhalten.

Parameter:

Dynamische Viskosität η_1 und η_2 , Elastizitätsmodul E_1 und E_2

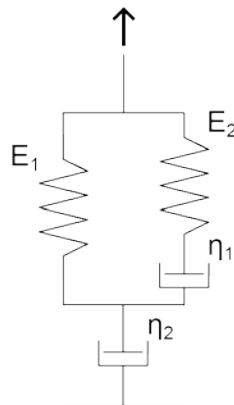


Abbildung 90: Monismith Modell

11.3.2 Krass Modell

Das Modell nach Krass mit 5 Parametern ist aus dem Burgers und Monismith Modell hergeleitet. Neben den elastischen und elastisch-viskosen Eigenschaften von Asphalt berücksichtigt dieses Modell auch die plastische und plastisch-viskose Verformung. Zurückgeführt wird das zusätzliche Verformungsverhalten auf das Gestein im Asphaltmischgut. Bei einer Belastung kommt es zu einer Kornverschiebung und irreversiblen Kornumlagerung, wodurch Reibungen entstehen. [35, S.18]

„Das betrachtete Modell besteht aus zwei Teilen mit jeweils elastischen und plastischen Eigenschaften, wobei diese Eigenschaften einmal zeitunabhängig, zum anderen infolge des parallel geschalteten Dämpfungsgliedes zeitabhängig auftreten.“ [35, S.19] Wird das Modell belastet, tritt sofort eine Dehnung ein, welche elastisch (E_1) und plastisch (P_1) ist. Der elastische Anteil steht für die Zusammendrückung des Asphaltes, wobei das elastische Bitumen sich wieder zurückdehnt. Die angesprochene Kornumlagerung ist hier der plastische Anteil. Durch die parallel geschalteten Elemente kommt es zu einem langsamen Anstieg der Dehnung, sie stellt die Langzeitdehnung des Asphaltes dar. Eine bleibende Verformung stellt sich durch die viskos-plastische Verformung (P_2, η) ein. Bei der Entlastung geht der elastische Teil (E_1) und der viskos-elastische Teil (E_2, η) wie beim Burgers Modell zurück.

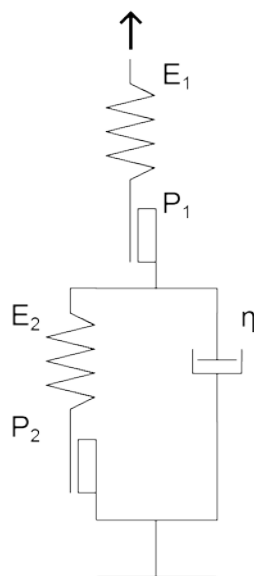


Abbildung 91: Krass Modell

Parameter:

Dynamische Viskosität η , Elastizitätsmodul E_1 und E_2 , Plastizitätsmodul P_1 und P_2

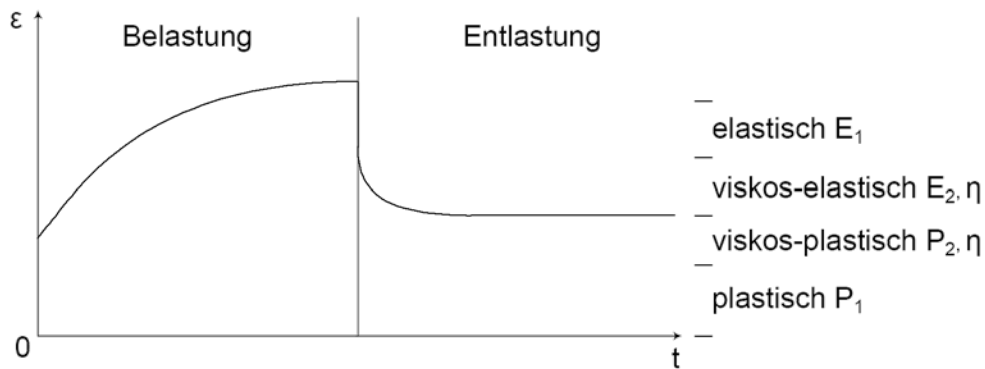


Abbildung 92: Verformungsverhalten des Krass Modelles

11.3.3 Husc hek Modell

Das Husc hek Modell ist eine Erweiterung des Modelles von Krass. Der zusätzliche Dämpfer in Reihe geschaltet berücksichtigt das Eindringen des Bitumens in die Hohlräume infolge der Verkehrsbelastung.

Das Verformungsverhalten entspricht im Wesentlichen dem des Krass Modelles. Durch den linearen Dämpfer kommt es bei Belastung zu einer flacheren Dehnungskurve, es nähert sich einem linearen Verlauf an. Zusätzlich kommt es bei Entlastung zu einer weiteren visko-plastischen Verformung (η_1).

Parameter:

Dynamische Viskosität η_1 und η_2 , Elastizitätsmodul E_1 und E_2 , Plastizitätsmodul P_1 und P_2

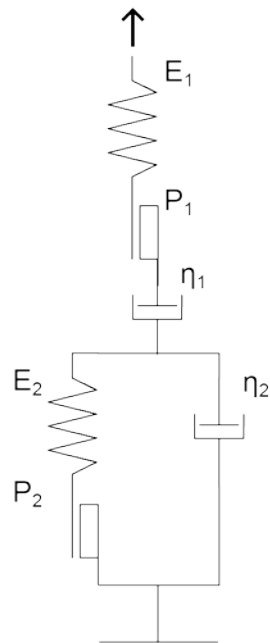


Abbildung 93: Huscek Modell

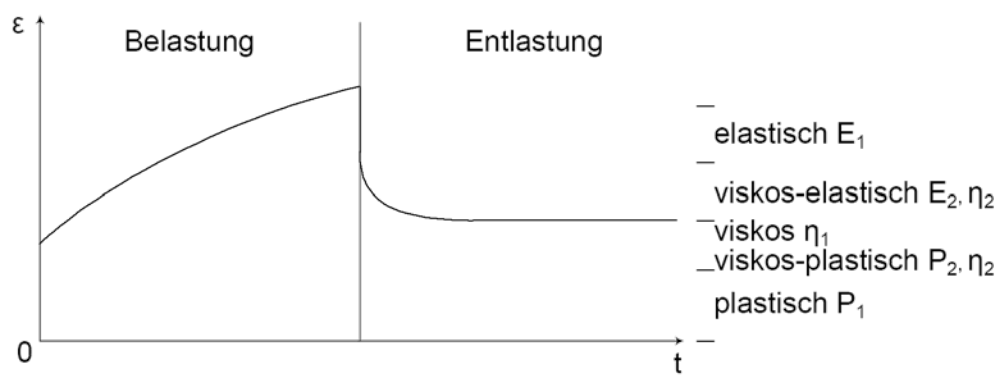


Abbildung 94: Verformungsverhalten des Huscek Modelles

11.3.4 Power-Law Modell

Ähnlich dem Maxwell Modell besteht dieses Modell aus einer Feder und einem in Reihe geschalteten parabolischen Dämpfer.

Eine Dehnung im Belastungsfall bildet sich ähnlich der des Maxwell Modells aus, eine sofortige elastische Dehnung und eine zeitlich abhängige Dehnung des Dämpfers. Durch die zusätzlichen Parameter des Dämpfers ist es aber möglich die Kriechgeschwindigkeit zu variieren. Wird das System entlastet, nimmt die elastische Dehnung den Wert Null an, der Dehnungsanteil des Dämpfers bleibt erhalten.

Das Modell lässt es zu das Kriechverhalten eines Asphaltes, detaillierter als das Maxwell Modell, mit mehreren Parametern zu beschreiben. Die Relaxationsfähigkeit bleibt unverändert gegeben.

Parameter:

Elastizitätsmodul E , materialabhängiger Parameter k , Grundkriechnachgiebigkeit J_a , Zeit bis zur Grundkriechnachgiebigkeit τ

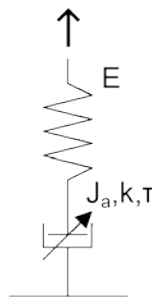


Abbildung 95: Power-Law Modell

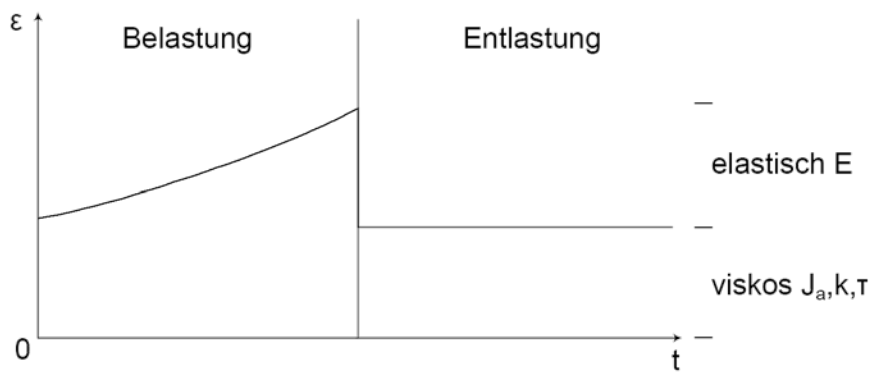


Abbildung 96: Verformungsverhalten des Power-Law Modelles

11.3.5 Huet Modell

Das Modell von Huet ist eine Erweiterung des Power-law Modells. Durch einen weiteren in Reihe geschalteten parabolischen Dämpfer lässt sich das Kriechverhalten unter Belastung noch genauer beschreiben. Es ist möglich, dass sich die Steigung der Kriechkurve drei Mal ändert.

Durch die lineare Feder zeigt das Modell im Belastungsfall eine sofortige Dehnung (E). Die nichtlinearen Dämpfer dehnen sich von der Zeit abhängig und verursachen eine viskoplastische Verformung. Liegt keine Belastung vor, zeigt dieses Modell nur einen sofortigen elastischen Dehnungsrückgang, den der Feder. [36, S.70]

„Huet entwickelte sein Modell zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Bitumen unter zyklisch-dynamischer Belastung.“ [36, S.75] Unter der Voraussetzung ausreichend tiefer Temperaturen lässt sich mit diesem Modell allerdings auch das Verformungsverhalten von Asphalt beschreiben.

Parameter:

Elastizitätsmodul E , materialabhängiger Parameter k_1 und k_2 , Grundkriechnachgiebigkeit J_a und J_b , Zeit bis zur Grundkriechnachgiebigkeit τ_1 und τ_2

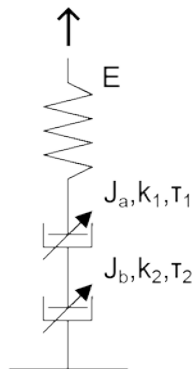


Abbildung 97: Huet Modell

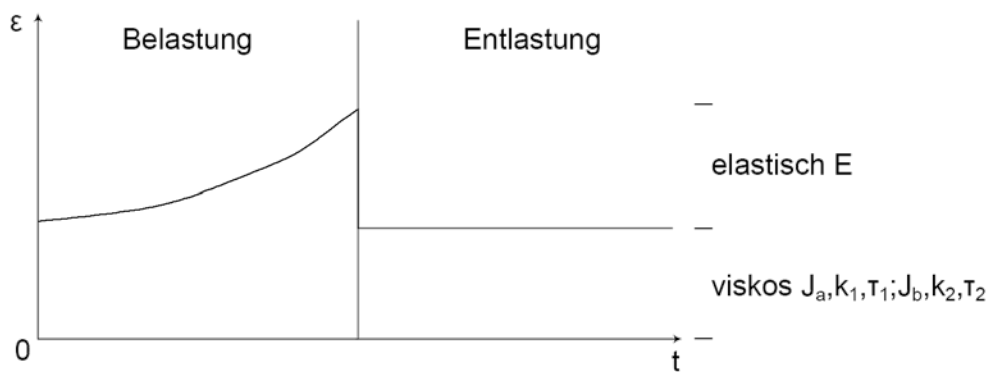


Abbildung 98: Verformungsverhalten des Huet Modelles

11.3.6 Huet-Sayegh Modell

Es ist eine Fortführung des Huet Modells, welche Sayegh 1965 aufstellte. Um der Schwäche von Reihenschaltungen bei dem Rückkriechverhalten entgegen zu wirken, ordnete Sayegh parallel zum Huet System ein Feder-Element an.

Häufig findet das Huet-Sayegh Modell Anwendung für die Beschreibung von Asphalt bei zyklischer Belastung. Für die Beschreibung des Verformungsverhaltens von Bitumen liefert dieses Modell keine befriedigenden Ergebnisse.

Parameter:

Elastizitätsmodul E_1 und E_2 , materialabhängiger Parameter k_1 und k_2 , Grundkriechnachgiebigkeit J_a und J_b , Zeit bis zur Grundkriechnachgiebigkeit τ_1 und τ_2

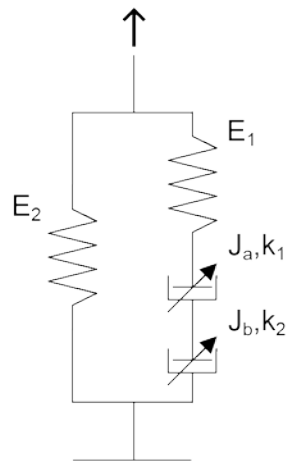


Abbildung 99: Huet-Sayegh Modell

11.3.7 2S2P1D Modell

Abschließend ist noch das 2S2P1D (2 springs 2 parabolic dashpots 1 dashpot) Modell von Olard und Benedetto zu nennen. Es erweitert das Huet-Sayegh Modell um einen linearen Dämpfer mit dem Ziel sowohl für „Asphaltmischungen als auch Bitumen ein gültiges viskoselastisches System“ [36, S.79] zu finden.

Parameter:

Elastizitätsmodul E_1 und E_2 , materialabhängiger Parameter k_1 und k_2 , Grundkriechnachgiebigkeit J_a und J_b , Zeit bis zur Grundkriechnachgiebigkeit τ_1 und τ_2 , dynamische Viskosität η

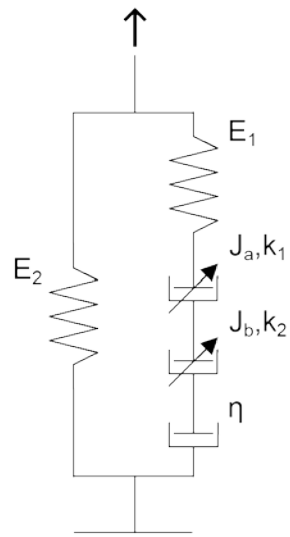


Abbildung 100: 2S2P1D Modell

12 Übertragung der Modelle auf das Verformungsverhalten von Epoxy Asphalt

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass sich das Verformungsverhalten des Epoxy Asphaltes deutlich von dem Verformungsverhalten eines konventionellen Asphaltes unterscheidet. Sowohl beim Spurbildungsversuch als auch beim dynamischen Druckschwellversuch wiesen die Probekörper aus Epoxy Asphalt nach Beendigung der Versuche nur minimale Verformungen auf.

Der größte Einflussfaktor auf das Verformungsverhalten des Epoxy Asphaltes ist der Epoxy-Gehalt, das heißt die Menge des im Asphaltmischgut enthaltenen Epoxydharzes. In den bisher durchgeführten Untersuchungen wurde bezogen auf den Gesamtbindemittelgehalt mit Epoxydharzmengen von 25% und 15% Epoxydharz sowie im Zuge der Grundlagenuntersuchungen auch von 5% Epoxydharz gearbeitet. Da sich in Abhängigkeit der Epoxydharzmenge die Eigenschaften des Epoxy Asphaltes verändern, muss auch ein mögliches rheologisches Modell diese Abhängigkeit in einer theoretischen Beschreibung widerspiegeln.

Aufgrund dieses Zusammenhanges lässt sich auch die wichtigste Anforderung an ein solches Modell ableiten: Bei geringem beziehungsweise nicht vorhandenem Anteil an Epoxydharz muss es in der Lage sein, auch das Verformungsverhalten eines konventionellen Asphaltes abbilden zu können.

Die Konsequenz aus o. g. Anforderung ist somit, dass ein Modell für die Beschreibung des Verformungsverhaltens von Epoxy Asphalt im Grundsatz aus einem bestehenden rheologischen Modell abgeleitet werden sollte. Als Modifikation muss jedoch zusätzlich an einem oder mehreren Elementen des Modells eine Variable für den Epoxy-Gehalt hinzugefügt werden.

Betrachtet man die zuvor beschriebenen bereits bestehenden rheologischen Modelle (vgl. Abschnitt 11) hinsichtlich eines möglichen Grundmodells, so erscheint das Burgers Modell (vgl. Abschnitt 11.2.3) hier am geeignetsten zu sein. Da mit diesem Modell sowohl eine Beschreibung des Relaxations- als auch des Kriechverhaltens möglich ist, erfüllt es grundsätzlich die zuvor definierte Anforderung zur Abbildung des Verformungsverhaltens von konventionellem Asphalt bei geringem beziehungsweise nicht vorhandenem Anteil an Epoxydharz.

Für die Abbildung höherer Epoxydharzanteile sind jedoch einige Variationen beziehungsweise Variablen einzufügen:

- Zum Einen werden beide Dämpfer als parabolische Dämpfer ausgebildet. Die veränderliche Variable ist der Epoxy-Gehalt.

- Zum Anderen ist die Federsteifigkeit der Feder aus dem Maxwell Modell (E_1) ebenfalls abhängig vom Epoxy-Gehalt.

Somit stellt sich das theoretische Modell zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Epoxy Asphalt wie folgt dar:

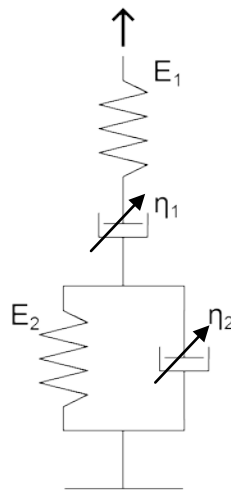


Abbildung 101: Modell für Epoxy Asphalt

Abhängig vom Epoxy-Gehalt ergeben sich somit unterschiedliche Verläufe des Verformungsverhaltens. Diese sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.

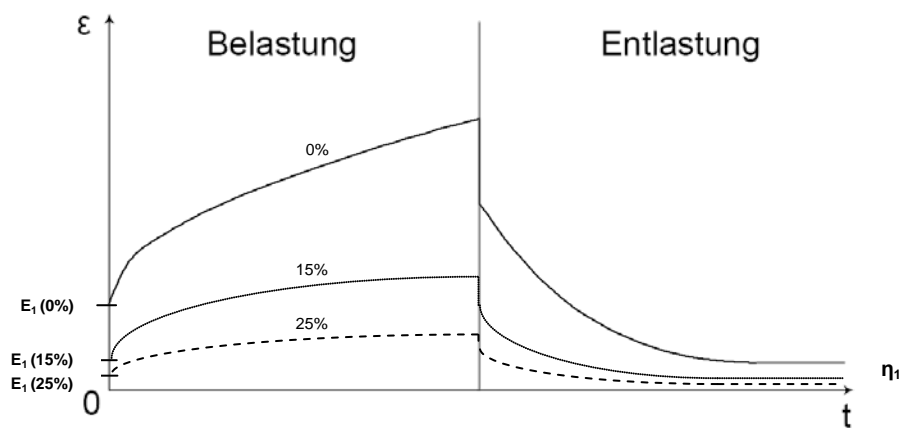


Abbildung 102: Verformungsverhalten von Epoxy Asphalt

Die Größe der elastischen Anfangsverformung aus der Feder des Maxwell Modells (E_1) ist abhängig von der Menge an Epoxydharz im Asphaltmischgut. Je mehr Epoxydharz zugegeben wird, desto größer ist die Festigkeit des Asphaltes und desto geringere elastische Verformungen stellen sich ein.

Analog zu den elastischen Verformungen verhalten sich die viskosen Verformungen aus dem Dämpfer-Element des Maxwell Modells. Die Untersuchungen zum Verformungswiderstand (vgl. Abschnitt 8.2) haben gezeigt, dass sich im Vergleich zu einem konventionellen Asphalt beim Epoxy Asphalt nur geringfügige bleibende Verformungen einstellen. Somit ist festzustellen, dass die viskosen Verformungen η_1 umso geringer ausfallen, je höher der Anteil an Epoxydharz ist. Berücksichtigt wurde hier auch die Tatsache, dass die Unterschiede im Verformungswiderstand zwischen den Zugabemengen von 15% und 25% Epoxydharz nur sehr gering ausfielen.

Die Steigung der Verformungskurve ist in erster Linie abhängig von der Verformung des Dämpfers im Kelvin-Voigt Modell (η_2). Da dieser als parabolischer Dämpfer mit dem Epoxy-Gehalt als veränderlicher Parameter gewählt wurde, ist somit auch die Steigung der Verformungskurve abhängig von der Menge an Epoxydharz im Asphaltmischgut. Je geringer der Epoxydharzanteil ist, desto größer ist die Zunahme der Verformung über die Belastungsdauer.

Diese Eigenschaft spiegelt sich auch in den festgestellten Verformungsverläufen bei den durchgeführten Spurbildungsversuchen wider (vgl. Abb. 35). Nach schneller Zunahme der Verformungen innerhalb der ersten 2.000 Überrollungen konsolidieren sich diese beim Epoxy Asphalt und bleiben anschließend konstant. Bei den beiden Referenzvarianten hingegen nimmt die Verformung bis zum Ende der Versuchsdauer kontinuierlich zu. Somit konnte eine Übereinstimmung im Verformungsverhalten des entwickelten theoretischen Modells mit dem ermittelten Verformungsverhalten im Rahmen der Überprüfung der mechanischen Eigenschaften an realen Probekörpern erzielt werden.

Die oben beschriebene Übertragung des Verformungsverhaltens von Epoxy Asphalt auf ein rheologisches Modell stellt lediglich eine erste Annäherung dar. Für eine weiterführende Beurteilung der Zusammenhänge ist ein Abgleich mit weiteren Versuchen im Labor erforderlich.

V.

Zusammenfassung

13 Zusammenfassung

Das deutsche Straßennetz besteht aus mehr als 600.000 km befestigten Straßen, von denen mehr als 90% in Asphaltbauweise ausgeführt wurden. Dieses Asphaltstraßennetz von Bund, Länder und Kommunen bildet u. a. die Grundlage für die Wirtschaftskraft des Standortes Bundesrepublik Deutschland.

Auf Grund dessen besteht das Bestreben, neben den bereits in der Praxis etablierten und bewährten Baustoffen mit Innovationen neue Baustoffgemische zu entwickeln, die hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Eigenschaften und Anforderungen wie nachhaltige Verformungsbeständigkeit und Gebrauchstauglichkeit eine zusätzliche Steigerung der Qualität und Wirtschaftlichkeit erzielen sollen.

Eine Orientierung an den zur Zeit auf dem Markt vorhandenen und gebräuchlichen Baustoffen und Produkte zeigt, dass tatsächlich Möglichkeiten bestehen, mit denen langlebige Deckschichten entwickelt werden könnten. Eine dieser Möglichkeiten stellt die Verwendung von Epoxydharz als Bindemittelzusatz bzw. einer teilweisen Substitution der gesamten Bitumenmenge im Asphaltmischgut und der dadurch entstehende „Epoxy Asphalt“ dar.

Im Rahmen dieser Arbeit sollte untersucht werden, inwiefern ein solcher Epoxy Asphalt einen Beitrag zur Entwicklung eines hochstandfesten und langlebigen Asphaltdeckschichtbelages liefern kann.

Die Verwendung von Epoxydharz im Bereich des Straßenbaus beschränkte sich in Deutschland in der Vergangenheit ausschließlich auf eine Kaltverarbeitung des 2-Komponentensystems. Im Ausland, namentlich in den USA sowie in China, wurde Epoxy Asphalt auf vereinzelt Stahlbrücken als Fahrbahnbelag verwendet.

Die Bearbeitung der Arbeit gliederte sich in drei Phasen. Die erste Phase beinhaltete grundlegende Untersuchungen mit unterschiedlichen Epoxydharzsystemen. Ziel dieser Versuche war die Identifizierung des Materialverhaltens im Asphaltmischgut, der dafür geeigneten Bedingungen sowie eine Bestimmung erster mechanischer Eigenschaften. Hierbei stellte sich heraus, dass ein Epoxydharzsystem mit Anhydridhärter ohne Verwendung eines Beschleunigers am geeignetsten ist.

In der zweiten Phase wurden mit dem in Phase I ausgewählten Epoxydharzsystem in unterschiedlichen Konzentrationen (15% und 25% Epoxy) die wichtigsten Bindemittel- und Mischgutkennwerte von Epoxy Asphalt mit Hilfe von standardisierten Prüfverfahren ermittelt und

den Kennwerten von konventionellem Bindemittel bzw. Asphalt (mit Straßenbaubitumen und mit Polymermodifiziertem Bitumen) gegenübergestellt.

Die **Bindemitteluntersuchungen** an den Bitumen-Epoxy-Gemischen lieferten als wesentliche Erkenntnis, dass die Zugabe des Epoxydharzes eine deutliche Reduzierung der Viskosität bewirkt. Der Grund hierfür ist darin zu sehen, dass die beiden Komponenten Harz und Härter im Bitumen nicht miteinander reagieren und keine Aushärtung stattfindet.

Beide Epoxy Varianten besaßen eine deutlich verbesserte **Verformungsbeständigkeit** bei hohen Temperaturen, wie die Ergebnisse der Spurbildungs- und der dynamischen Druckschwellversuche gezeigt haben. Die Probekörper aus Epoxy Asphalt wiesen erheblich kleinere Verformungen als die Probekörper der Referenzvarianten auf.

Durch die Zugabe von Epoxydharz konnte sowohl das **Haftverhalten** des Bindemittels am Einzelkorn als auch das Haftverhalten im Mischgut gegenüber den Referenzvarianten wesentlich verbessert werden. Zudem zeigten Scherversuche, dass eine ausreichende Verklebung zwischen der Asphaltbinderschicht und der Deckschicht aus Epoxy Asphalt gewährleistet werden kann.

Ferner konnte festgestellt werden, dass mit der Zugabe von Epoxydharz in das Asphaltmischgut der Widerstand gegen wiederholte zyklische Belastungen und damit der **Ermüdungswiderstand** deutlich verbessert wird.

Darüber hinaus lassen die Untersuchungsergebnisse auch erkennen, dass eine **Zugabemenge** von 25% Epoxydharz zwar vereinzelt geringfügig bessere Ergebnisse bringt als „nur“ 15%, für viele Eigenschaften die Ergebnisse jedoch nahezu identisch ausfallen. Daher war nach Abschluss der durchgeführten Prüfungen festzustellen, dass eine Zugabe von 15% Epoxydharz im Asphaltmischgut für die Sicherstellung der hohen Standfestigkeit und Langlebigkeit ausreichend ist.

Im Zuge der Bearbeitung der ersten beiden Phasen ergaben sich weitere spezielle Fragestellungen, die über den Rahmen der grundsätzlichen und standardisierten Prüfungen von Asphalt hinausgingen.

So wurde zunächst versucht, die Ursache für das Ausbleiben der Reaktion von Harz und Härter im Bitumen zu klären. Dies geschah über eine Prüfung des Erweichungspunktes einerseits von Bindemittel-Füller-Gemischen und andererseits an mit Phosphorsäure versetzten Bindemitteln. Beide zunächst vermuteten Lösungsansätze lieferten jedoch keine Erklärung für das Ausbleiben des Härtungsvorgangs.

Ferner wurde überprüft, ob und inwiefern Epoxy Asphalt nach der Aushärtung noch granuliert und anschließend extrahiert werden kann. Sowohl das Aufschmelzen des Mischgutes als auch die anschließende Trennung von Bindemittel und Gesteinskörnungen verliefen erfolgreich. Jedoch stellte sich die Frage nach dem Verbleib des Epoxydharzes nach der Extraktion. Eine chemische Analyse der Endprodukte der Extraktion (rückgewonnenes Bindemittel, Gesteinskörnungen und Füller) zeigte, dass nur etwa 60% der ursprünglich zugegebenen Epoxydharzmenge im Bitumen verbleibt. An den Gesteinskörnern sowie im Füller konnten nur geringe Mengen an Epoxydharz ermittelt werden. Der Verbleib des restlichen Epoxydharzes ist zu diesem Zeitpunkt nicht bekannt.

Bereits zu Beginn der Untersuchungen wurden einige Platten aus Epoxy Asphalt einer zehnmonatigen Bewitterung im Freien ausgesetzt, um eine eventuelle witterungsbedingte Veränderung der Oberfläche zu überprüfen. Dies erfolgte durch eine im Abstand von vier Wochen durchgeführte Messung der Mikrorauheit mittels SRT-Pendel. Hier konnte jedoch kein merklicher Einfluss einzelner jahreszeitlicher und damit klimatischer Veränderungen festgestellt werden.

In der Rundlaufprüfanlage der Bundesanstalt für Straßenwesen wurde darüber hinaus die Entwicklung der Mikrorauheit von Deckschichten aus Epoxy Asphalt unter einer Verkehrsbelastung untersucht. Deren Messung erfolgte ebenfalls mittels SRT-Pendel und brachte die Erkenntnis, dass die Rauheit des Epoxy Asphaltes etwas geringer (ca. drei SRT-Einheiten) als bei einem konventionellen Asphalt ist. Hieraus ist jedoch nicht zwangsläufig eine etwas geringere Griffigkeit des Epoxy Asphaltes abzuleiten.

Mittels dynamischem 3-Punkt-Biegeversuch wurde überprüft, ob die Verwendung von Epoxydharz im Asphaltmischgut einen negativen Einfluss auf den Widerstand gegen dauerhafte Belastungen bei tiefen Temperaturen verursacht. Die Wahl der Probekörperform erfolgte in Anlehnung an die prEN 12697-44. Die ermittelten Ergebnisse zeigten, dass der Widerstand gegen die aufgebrachte Belastung beim Epoxy Asphalt keine Nachteile im Vergleich zu einem konventionellen Asphaltmischgut erkennen lässt.

Nach Abschluss der hier beschriebenen Untersuchungen sind die Auswirkungen von Epoxydharz im Asphaltmischgut weitgehend bekannt und die Veränderungen der Eigenschaften konnten identifiziert werden.

Das Potential von Epoxy Asphalt als alternatives und innovatives Asphaltmischgut für hochbelastete Verkehrsflächen mit hoher Dauerhaftigkeit konnte im Labormaßstab zweifelsfrei nachgewiesen werden. Mehrere der geprüften wesentlichen Gebrauchseigenschaften des

Epoxy Asphaltes erwiesen sich als deutlich besser im Vergleich zu den geprüften Referenzvarianten. Daher ist zukünftig eine Fortschreibung der Untersuchungen in Form einer Anlage von Versuchsabschnitten im Maßstab 1:1 anzustreben. Hierbei sind die unter Abschnitt 10.7 aufgeführten Punkte zu beachten und die offen gebliebenen Fragestellungen zu beantworten.

Für eine großmaßstäbliche Anwendung ist zunächst eine Modifizierung und Optimierung des Epoxydharzes durch den Hersteller in Bezug auf eine Verwendung im Heißmischgut erforderlich. Anschließend ist eine enge Zusammenarbeit und Abstimmung zwischen dem Hersteller des Epoxydharzes, dem Asphaltmischwerk sowie der einbauenden Firma Voraussetzung für das Anlegen erster Versuchsfelder.

14 Literaturverzeichnis

- [1] ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPEMENT
Economic Evaluation of Long-Life-Pavements
Phase I Report
- [2] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.
DIN 16945, Reaktionsharze, Reaktionsmittel und Reaktionsharzmassen
Beuth Verlag
- [3] WWW.SEILNACHT.COM
- [4] WWW.CHEMIE.FU-BERLIN.DE
- [5] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN
Merkblatt für die Herstellung von Halbstarren Deckschichten (M HD)
FGSV-Verlag, 2004
- [6] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN
Merkblatt für Griffigkeitsverbessernde Maßnahmen an Verkehrsflächen aus
Asphalt
FGSV-Verlag, 2002
- [7] CIVIL ENGINEERING MAGAZINE
Crossing the Yangtze
Ausgabe Februar 2002
- [8] WWW.BRIDGEBWEB.COM
- [9] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von
Fahrbahndecken aus Asphalt (ZTV Asphalt – StB 01)
FGSV-Verlag, 2001
- [10] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN
Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt
FGSV-Verlag, 1998
- [11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.
DIN 1996, Prüfung von Asphalt
Teil 4, Prüfung von Asphalt; Herstellung von Probekörpern aus Mischgut
Beuth Verlag

- [12] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN
Arbeitsanleitung zur Prüfung von Asphalt
Teil 11: Herstellung von Asphaltprobeplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-
Verdichtungsgerät (ALP A-StB, Teil 11)
FGSV-Verlag, 2003

- [13] STÖCKERT, ULRIKE
Ein Beitrag zur Festlegung von Grenzwerten für den Schichtenverbund im Asphalt-
straßenbau
Dissertation TU Darmstadt, 2002

- [14] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.
DIN EN 12697, Prüfverfahren für Heißasphalt
Teil 1, Löslicher Bindemittelgehalt
Beuth Verlag

- [15] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN
Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau
Teil: Messverfahren SRT (TP Griff-StB (SRT))
FGSV-Verlag, 2004

- [16] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION (CEN)
prEN 12697-44, Test methods for hot mix asphalt
Part 44: Crack Propagation by Semi-Circular Bending Test
Oktober 2005

- [17] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.
DIN EN 1427, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel
Bestimmung des Erweichungspunktes, Ring- und Kugel-Verfahren
Beuth Verlag

- [18] STRAUBE, EDELTRAUD; KRASS, KLAUS
Straßenbau und Straßenerhaltung
Erich Schmidt Verlag, 8. Auflage 2005

- [19] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.
DIN EN 14770, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel
Bestimmung des komplexen Schubmoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches
Scherrheometer (DSR)
Beuth Verlag

- [20] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.
DIN 52013, Prüfung von Bitumen
Bestimmung der Duktilität
Beuth Verlag

- [21] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.
DIN EN 13589, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel
Bestimmung der Streckeigenschaften von modifiziertem Bitumen mit dem Kraft-Duktilitäts-Verfahren
Beuth Verlag

- [22] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.
DIN EN 14771, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel
Bestimmung der Biegekriechsteifigkeit – Biegebalkenrheometer (BBR)
Beuth Verlag

- [23] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.
DIN EN 12697, Prüfverfahren für Heißasphalt
Teil 22, Spurbildungstest
Beuth Verlag

- [24] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN
Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau
Teil 22: Spurbildungsversuch (TP A-22)
Entwurfssfassung Stand 02/2007

- [25] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN
Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau, Teil: Einaxialer Druck-schwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalten bei Wärme (TP A-StB)
FGSV-Verlag, 1999

- [26] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.
DIN EN 12697, Prüfverfahren für Heißasphalt
Teil 11, Bestimmung der Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen
Beuth Verlag

- [27] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.
DIN EN 12697, Prüfverfahren für Heißasphalt
Teil 23, Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit von Asphalt-Probekörpern
Beuth Verlag

- [28] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.
DIN EN 12697, Prüfverfahren für Heißasphalt
Teil 12, Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von Asphalt-Probekörpern
Beuth Verlag

- [29] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN
Begriffsbestimmungen, Teil: Straßenbautechnik
FGSV-Verlag, 2003

- [30] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN
Arbeitsanleitung zur Prüfung von Asphalt
Teil 4: Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner (ALP A-StB, Teil 4)
FGSV-Verlag, 1999
- [31] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.
DIN EN 12697, Prüfverfahren für Heißasphalt
Teil 24, Beständigkeit gegen Ermüdung
Beuth Verlag
- [32] WWW.CHEMCOSYSTEMS.COM
- [33] STAUDT, SVEN
Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalt mit Hilfe des Finite-
Elemente-Programm ABAQUS
Bachelor-Thesis Universität Duisburg-Essen, 2008
- [34] GROSS, D., HAUGER, W., SCHNELL, W. UND SCHRÖDER, J.
Technische Mechanik 2 Elastostatik
Springer Verlag, 2005
- [35] KRASS, K.
Kriechuntersuchungen an zylindrischen Asphaltprobekörpern
Universität Karlsruhe (TH), 1971
- [36] HOFKO, B.
Rheologische Modelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphal-
ten
E 233 Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, 2006
- [37] FINDLEY, W.N., LAI, J.S. UND ONARAN, K.
Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials
North-Holland Publ., 1976
- [38] MANG, H.A. UND HOFSTETTER, G.
Festigkeitslehre
Springer Verlag Wien, 2000

Anhang

Verzeichnis der Anhänge

Anhang 1: Beschreibung der Prüfverfahren

Anhang 2: Ergebnisse der BBR-Prüfungen

Anhang 3: Ergebnisse der Spurbildungsversuche

Anhang 4: Ergebnisse der Druckschwellversuche

Anhang 5: Ergebnisse der Affinitätsprüfungen

Anhang 6: Ergebnisse der Dreipunkt-Biegeversuche

Anhang 7: Ergebnisse der Prüfung des Widerstandes gegen eine Dauerbelastung bei tiefen Temperaturen

Anhang 1: Beschreibung der Prüfverfahren

Bindemittelprüfungen

Erweichungspunkt Ring und Kugel

Mit der Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel (EP RuK) nach DIN EN 1427, „Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren“ [17] besteht eine Möglichkeit, einen Hinweis auf den Einfluss des Epoxydharzes auf das Verhalten des Bitumen-Epoxy-Gemisches bei hohen Temperaturen zu erhalten.

Durch dieses Prüfverfahren wird die Temperatur ermittelt, die den fließenden Übergang vom festen zum flüssigen Aggregatzustand des Bitumens beschreibt. Als EP RuK gilt der Temperaturwert, der erreicht ist, wenn die in einen Metallring gegossene Bitumenschicht (vgl. Abb. A1-1) bei gleichmäßiger Erwärmung in einer Prüfflüssigkeit durch das Gewicht einer Stahlkugel eine definierte Verformung erfährt.

Je höher der Erweichungspunkt liegt, umso härter ist das Bitumen.



Abbildung A1-1: Einfüllen der Bitumenschicht in die Metallringe

Eine Prinzipskizze der Versuchsdurchführung zeigt die Abbildung A1-2. Das Einsinken der Kugel in die Bindemittelschicht ist in den Abbildungen A1-3 und A1-4 dargestellt.

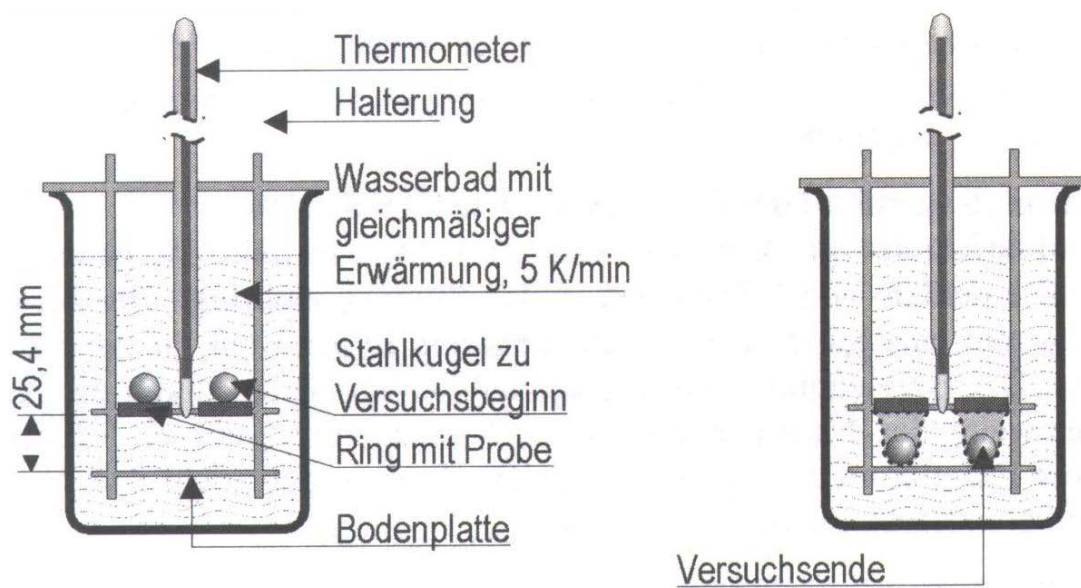


Abbildung A1-2: Prinzipskizze Erweichungspunkt Ring und Kugel [18]



Abbildung A1-3: Beginnendes Einsinken der Kugeln



Abbildung A1-4: Erreichen der EP-Temperatur

Dynamisches Scherrheometer

Die Durchführung der Untersuchungen erfolgte gemäß DIN EN 14770, „Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR)“ [19].

Mit dem dynamischen Scherrheometer lassen sich die viskosen und elastischen Eigenschaften von Bitumen und modifizierten Bitumen bestimmen. Die Bindemittelprobe

befindet sich hierbei zwischen einer feststehenden und einer oszillierenden Platte, deren Auslenkung und Geschwindigkeit variiert werden kann (vgl. Abb. A1-5). Die Temperatur und die Stärke der Bitumenschicht zwischen den Platten stellen weitere Variable der Prüfung dar. Als Prüfergebnis erhält man einen komplexen Schubmodul und einen Phasenwinkel.

Der komplexe Schubmodul entspricht dem Widerstand der untersuchten Probe gegen eine erzwungene Verformung. Der Phasenwinkel beschreibt die Verschiebung zwischen dem Zeitpunkt der eingeleiteten Scherspannung und der daraus resultierenden Verformung der Probe. Idealelastische Proben weisen einen Phasenwinkel von 0° auf, der Phasenwinkel rein viskoser Medien beträgt 90° . Bei viskoelastischen Substanzen wie Bitumen liegt der Phasenwinkel im Bereich zwischen 0° und 90° .

Hinsichtlich der Bewertung der rheologischen Eigenschaften von Bitumen besitzt das DSR den Vorteil, dass diese Eigenschaften über einen Temperaturbereich von etwa 30°C bis 120°C messtechnisch erfasst werden können. Dies gilt sowohl für Straßenbau- und polymermodifizierte Bitumen als auch für Bitumen, die mit Additiven modifiziert sind.

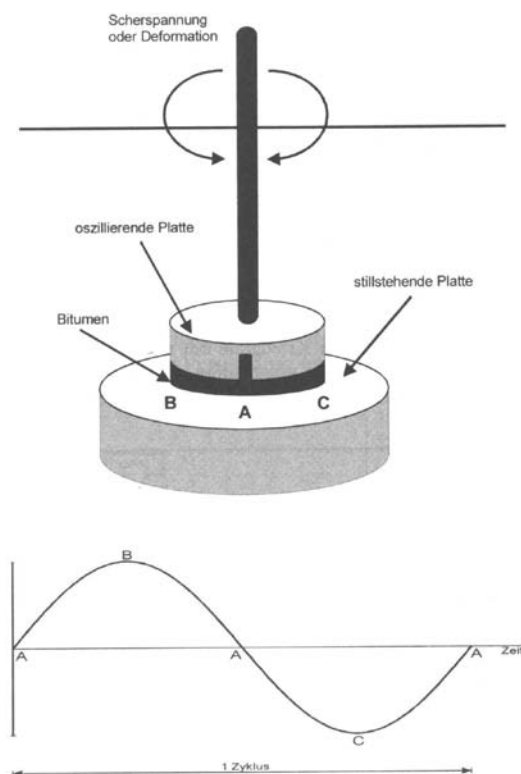


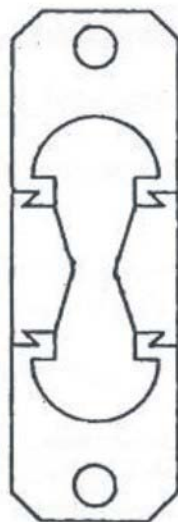
Abbildung A1-5: Prinzipskizze Dynamisches Scherrheometer [18]

Kraftduktilometer

Die Prüfung der Kraftduktilität ist ein einfaches Verfahren, das zur Beschreibung von Materialeigenschaften dient. Das Prüfprinzip entspricht einem Zugversuch. Einfluss auf das Prüfergebn haben dabei die Prüfkörperform, die Zuggeschwindigkeit und die Prüftemperatur.

Für die Durchführung der Kraftduktilitätsversuche sind zwei verschiedene Prüfkörperformen gebräuchlich (vgl. Abb. A1-6): eine Form nach DIN 52013, „Prüfung von Bitumen – Bestimmung der Duktilität“ [20] sowie eine Weitere nach DIN EN 13589, „Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Streckeigenschaften von modifiziertem Bitumen mit dem Kraft-Duktilitäts-Verfahren“ [21].

DIN 52013



DIN EN 13589

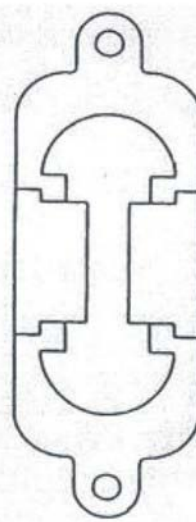


Abbildung A1-6: Unterschiedliche Prüfkörperformen bei der Duktilitätsprüfung

Der Prüfkörper nach DIN 52013 besitzt in der Mitte durch die Verjüngung im Prinzip eine Sollbruchstelle, wohingegen nach DIN EN 13589 die beiden Prüfkörperenden durch einen Steg von konstanter Breite miteinander verbunden sind.

Als Ergebnis Prüfung erhält man das aufgewendete Kraftmaximum sowie die maximale Ausziehlänge. Diese kann aufgrund der Abmessungen der Prüfeinrichtung höchstens 100 cm betragen. Ursachen für kürzere Ausziehlängen können entweder ein Reißen des Bitumenfadens oder ein vorzeitiger Abbruch des Versuchs sein. Dies ist der Fall, wenn der

Bitumenfaden zwar noch nicht gerissen, die aufzubringende Zugkraft jedoch kaum noch messbar ist.

Die Durchführung der Untersuchungen zur Duktilität erfolgte mit einer Prüfkörperform gemäß DIN EN 13589 (vgl. Abb. A1-7). Die Prüftemperatur wurde auf 15°C festgelegt und die Zuggeschwindigkeit für das Auseinanderziehen der Bindemittelprobe lag bei 50 mm/min.

Die Abbildungen A1-8 und A1-9 illustrieren den Versuchsablauf bei einer Kraft-Duktilitäts-Prüfung.



Abbildung A1-7: Ausgießen der Formen nach DIN EN 13589



Abbildung A1-8: Probekörper zu Beginn der Prüfung



Abbildung A1-9: Probekörper während der Prüfung

Bending Beam Rheometer

Mit dem Biegebalkenrheometer (BBR) können die Tieftemperatureigenschaften von Bitumen beschrieben werden. Hierbei wird auf einen prismatischen Prüfkörper mittig eine konstante Last aufgebracht (vgl. Abb. A1-10) und die Durchbiegung des Prüfkörpers gemessen.

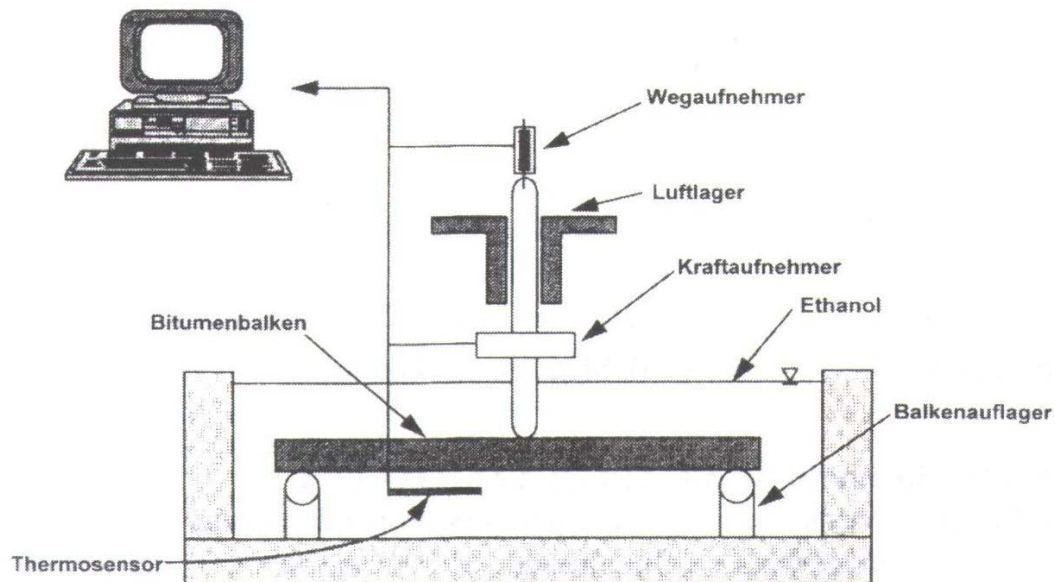


Abbildung A1-10: Prinzipskizze Bending Beam Rheometer [18]

Als Ergebnis liefert das Biegebalkenrheometer die Durchbiegung in Abhängigkeit von der Zeit über eine Gesamtversuchsdauer von 240 Sekunden. Für eine vergleichende Bewertung unterschiedlicher Bindemittel an einem Einzelwert werden hier die Ergebnisse für die Belastungsdauer von 60 Sekunden betrachtet.

Als Prüfbedingungen wurden im Rahmen dieser Arbeit gemäß DIN EN 14771, „Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Biegebiegesteifigkeit – Biegebalkenrheometer“ [22] eine Temperatur von -16°C und eine Last von 0,981 N angesetzt.

Die Abbildungen A1-11 bis A1-13 zeigen die Herstellung eines Prüfkörpers, einen Prüfkörper, der in das Biegebalkenrheometer eingelegt ist und einen Prüfkörper nach Belastung.



Abbildung A1-11: Herstellen des BBR-Prüfkörpers

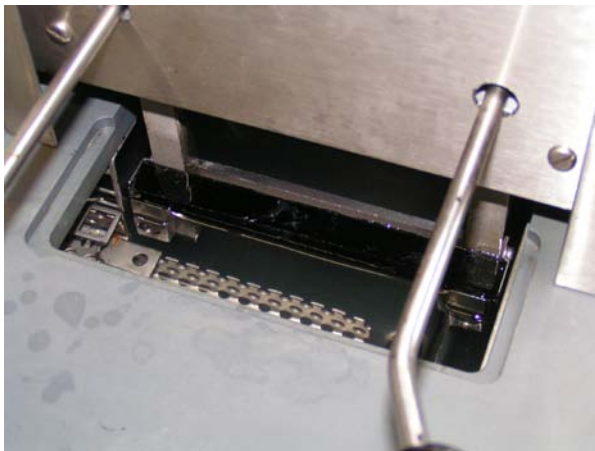


Abbildung A1-12: Prüfkörper im BBR



Abbildung A1-13: Prüfkörper nach BBR-Prüfung

Asphaltprüfungen

Nachfolgend sind die im Rahmen dieser Forschungsarbeit angewendeten Prüfverfahren für Asphaltmischgut aufgeführt und näher beschrieben. Es soll überprüft werden, ob die mit Epoxydharz modifizierten Asphalte sich als hochstandfest und langlebig erweisen. Mit den gewählten Prüfverfahren sollten die Eigenschaften Verformungsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit beschrieben werden.

Spurbildungsversuch

Der Spurbildungsversuch an Asphaltprobekörpern liefert Aussagen bezüglich des Widerstandes gegen bleibende Verformungen.

Für die Durchführung existiert eine Europäische Prüfnorm für Asphalt [23], die national zukünftig in die „Technische Prüfvorschrift für Asphalt, Teil 22: Spurbildungsversuch“ (TPA-22) [24] umgesetzt wird.

Die DIN EN 12697-22, „Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 22: Spurbildungstest“ bietet unterschiedliche Möglichkeiten für die Wahl der Prüfbedingungen an. Neben der Verwendung eines Stahlrades anstatt eines Gummirades (vgl. Abb. A2-1) kann die Prüfung sowohl im Wasser- als auch im Luftbad erfolgen. Die Prüftemperatur ist nicht festgelegt.

Als Ergebnis liefert der Spurbildungsversuch die Spurrinnentiefe nach 20000 Überrollungen sowie den Verlauf der Spurrinnenentwicklung über die gesamte Versuchsdauer.

Die neue TP A-StB-22 als nationale Umsetzung der DIN EN 12697-22 präzisiert die in der DIN EN aufgeführten Prüfbedingungen. In ihr werden als Prüfbedingungen das Gummirad, das Luftbad sowie eine Prüftemperatur von 50°C oder 60°C genannt. Die endgültige Prüftemperatur war zum Zeitpunkt der Prüfung noch nicht festgelegt.

Eines der Ziele dieser Arbeit ist die Entwicklung eines hochstandfesten Deckschichtbelages. Um die höheren Anforderungen an einen solchen Asphalt hinsichtlich der Verformungsbeständigkeit prüftechnisch zu erfassen, wurde die Prüftemperatur auf 60°C festgelegt. Die Bedingungen Gummirad und Luftbad wurden beibehalten.

Geprüft wurden WSV-Platten mit einer Dicke von 40 mm.



Abbildung A2-1: Spurbildungsversuch

Druckschwellversuch

Neben dem Spurbildungsversuch wurde im Rahmen dieser Arbeit die Verformungsbeständigkeit mit Hilfe des einaxialen dynamischen Druckschwellversuches (DSV) bestimmt. Diese wurden nach der „Technischen Prüfvorschrift für Asphalt im Straßenbau TP A-StB, Teil: Einaxialer Druckschwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalten bei Wärme“ [25] durchgeführt.

Hierbei wird ein zylindrischer Asphaltprobekörper bei konstanter Prüftemperatur einer haversin-impulsförmigen zyklischen Druckbelastung unterworfen und die sich hierdurch einstellenden Verformungen in Belastungsrichtung registriert und aufgezeichnet. Der zeitliche Ablauf der Belastung erfolgt in einem ständigen Wechsel von Oberlast P_o und Unterlast P_u (vgl. Abb. A2-2).

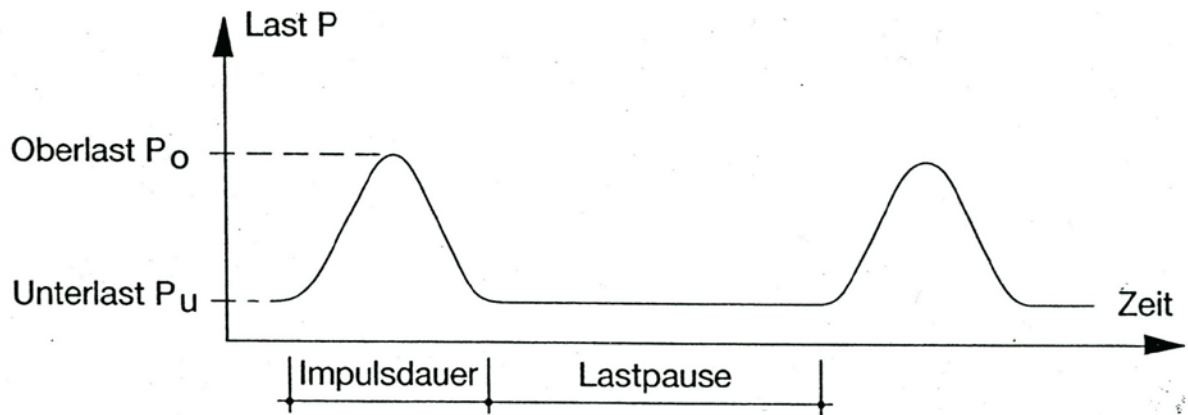


Abbildung A2-2: zeitlicher Ablauf der Belastung beim Druckschwellversuch [25]

Die Übertragung der Kraft auf die Grundfläche des Probekörpers erfolgt mit Hilfe eines Lasteinleitungsstempels (vgl. Abb. A2-4), der eine gleichmäßige Lastverteilung ermöglicht.

Vor der Versuchsdurchführung wird der vorbereitete Probekörper mindestens 2,5 Stunden in der bereits vorher auf Prüftemperatur gebrachten Kammer der Prüfmaschine (vgl. Abb. A2-3) gelagert und anschließend zentrisch in die Belastungsvorrichtung eingebaut.

Die Prüftemperatur wurde hier analog zum Spurbildungsversuch ebenfalls auf 60°C festgelegt, um die erwartete hohe Verformungsbeständigkeit differenzierter darstellen zu können.

Die Oberlast P_o wurde gemäß Technischer Prüfvorschrift für Splittmastixasphalt (Walzasphalt für besondere Beanspruchungen) auf 2,8 kN (entspricht einer Oberspannung von 0,35 N/mm²) und die Unterlast P_u auf 0,2 kN festgelegt.

Das Ergebnis des Druckschwellversuches ist eine Impulskriechkurve, die den Verlauf der bleibenden Verformung des Probekörpers wiedergibt. Eine idealisierte Impulskriechkurve ist exemplarisch in Abbildung A2-5 dargestellt.

Die Beurteilung des Verformungsverhaltens erfolgt hier anhand des Wendepunktes. Hier ist die Verformungsrate nach der Konsolidierung (Phase 1) am geringsten und die Kurve zeigt einen Wendepunkt. Die Bestimmung dieses Wendepunktes erfolgt gemäß Abschnitt 6.3.1 der Technischen Prüfvorschrift über eine Auswertung der Steigung der Impulskriechkurve.

Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen sind für die jeweiligen Asphaltprobekörper (Marshall-Probekörper) die zugehörige Anzahl der Belastungen im Wendepunkt sowie die Verformung im Wendepunkt angegeben.



Abbildung A2-3: Klimakammer der Prüfmaschine



Abbildung A2-4: Lasteinleitungsstempel

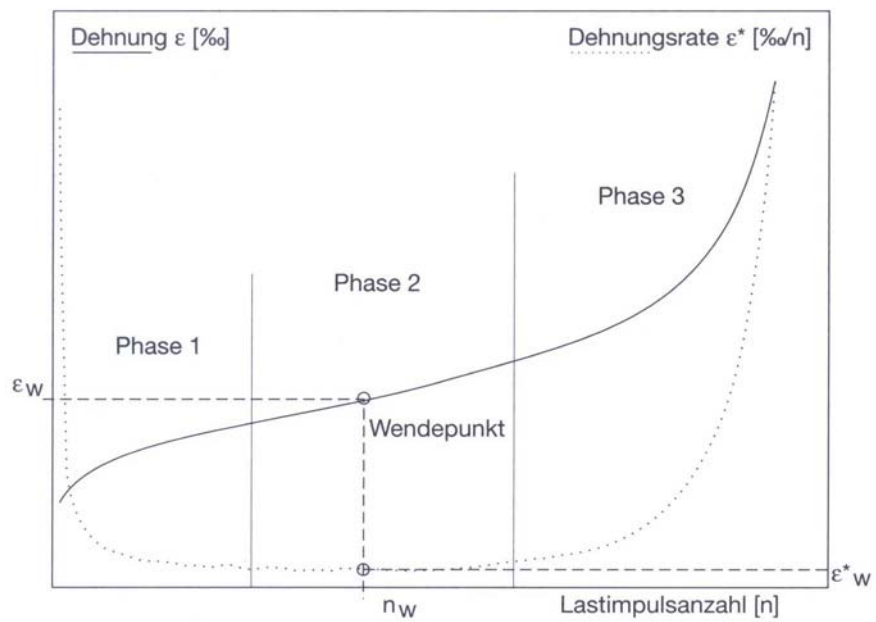


Abbildung A2-5: Impulskriechkurve des Druckschwellversuchs [25]

Prüfung des Haftverhaltens am Einzelkorn

Eine ausreichende Haftung des Bindemittels an den Gesteinskörnungen ist eine der Grundvoraussetzungen für die Herstellung von dauerhaften und langlebigen Deckschichten aus Asphalt. Insbesondere bei relativ dünnen Bindemittelfilmen und pulsierendem Angriff eines anstehenden Wassers infolge der Verkehrsbelastung kann die Verwendung eines haftungskritischen Gesteins zu einer Schädigung der betroffenen Schicht und damit des gesamten Asphaltkörpers führen.

Die Untersuchung der Haftungseigenschaften des Bindemittels am Einzelkorn erfolgte gemäß DIN EN 12697-11, „Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 11: Bestimmung der Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen“ [26]. Sie definiert die Affinität als „Grad der Umhüllung mit Bitumen, der durch visuelle Beurteilung von unverdichteten bitumenumhüllten Gesteinskörnungen nach der Beanspruchung durch mechanisches Rühren in Anwesenheit von Wasser bestimmt wird.“

Vor der Umhüllung der verwendeten Gesteinskörnung 8/11 wird diese, wie auch das zur Anwendung kommende Bindemittel, auf die vorgesehene Temperatur erhitzt. Anschließend werden die Gesteinskörner und eine definierte Bitumenmenge abhängig von der Rohdichte des Gesteins miteinander vermischt, bis eine vollständige Umhüllung der Gesteinskörner erreicht ist. Nach Abkühlung der Probe wird diese in eine Flasche mit 5°C kaltem Wasser gefüllt. In die Flasche wird ein Glasstab eingefügt, der mit Hilfe eines Gummischlauches zwischen Flaschenboden und Schraubverschluss eingeklemmt wird (vgl. Abb. A2-6).

Die befüllte Flasche wird zunächst für sechs Stunden auf einem Pyknometerrollgerät mit einer fest definierten Geschwindigkeit gerollt (vgl. Abb. A2-7). Anschließend wird sie entleert, die umhüllten Gesteinskörner in eine Glasschale gegeben und mit entionisiertem Wasser übergossen. Der Grad der Umhüllung ist per Augenschein auf 5 Prozent zu schätzen.

Nach dieser ersten Bestimmung des Umhüllungsgrades werden die Gesteinskörner wieder in die Flasche gegeben und mit dem bereits verwendeten Wasser aufgefüllt. Es folgt eine weitere Rollzeit von 18 Stunden, nach der erneut der verbliebene Grad der Umhüllung zu ermitteln ist.

Das Prüfergebnis wird aus drei Einzelwerten ermittelt.



Abbildung A2-6: Flasche mit Glasstab



Abbildung A2-7: Flaschen auf dem Rollgerät

Spaltzugversuch

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte die Bestimmung der Spaltzugfestigkeit gemäß DIN EN 12697-23, „Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit von Asphalt-Probekörpern“ [27].

Beim statischen Spaltzugversuch wird ein zylindrischer Probekörper durch zwei sich gegenüberliegende Lastverteilungstreifen auf der Mantelfläche (vgl. Abb. A2-8) unter konstanter Lastzunahme bis zum Bruch belastet. Aus der Bruchlast und der Probekörpergeometrie wird die indirekte Zugfestigkeit ITS (Indirect Tensile Strength) berechnet.

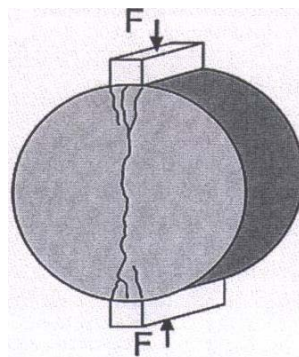


Abbildung A2-8: Prinzipskizze des Spaltzugversuchs [27]

Da im Hinblick auf die Langlebig- und damit der Dauerhaftigkeit von Asphaltdeckschichten unter anderem der Frage der Wasserempfindlichkeit eine erhebliche Bedeutung beigemessen wird, ist auch der Einfluss des Wassers auf die Zugfestigkeit näher zu betrachten. Dieser konnte gemäß DIN EN 12697-12, „Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von Asphalt-Probekörpern“ [28] in den Vorgang der Spaltzugprüfung mit aufgenommen werden.

Ziel dieses Vorgehens war die Bestimmung des Einflusses der Wassersättigung und der beschleunigten Klimatisierung durch Wasserlagerung auf die indirekte Zugfestigkeit von zylindrischen Asphalt-Probekörpern.

Um dies zu erreichen, wurden die Probekörper zunächst in ein mit Wasser gefülltes Vakuumgefäß gelegt und anschließend evakuiert, um sämtliche zugänglichen Hohlräume mit Wasser zu füllen. Hierauf folgte eine Lagerung im Wasserbad bei 40°C für eine Dauer von 68 bis 72 Stunden.

Vor der Spaltzugprüfung gemäß Teil 23 der DIN EN 12697 wurden die Probekörper für mindestens zwei Stunden auf die gewünschte Prüftemperatur von 5°C gebracht.

Im Anschluss konnten die Probekörper in die Prüfvorrichtung eingebracht (vgl. Abb. A2-9) und der Prüfvorgang gestartet werden.

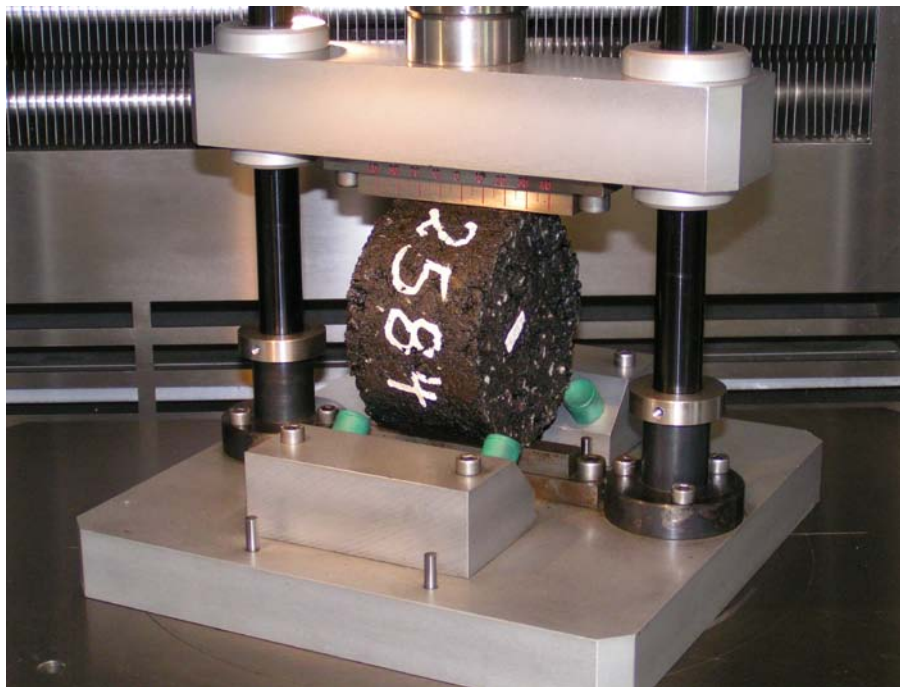


Abbildung A2-9: Prüfvorrichtung für den Spaltzugversuch

Man unterscheidet grundsätzlich drei verschiedene Brucharten:

- a) „eindeutig Zugbruch“ – glatter Bruch entlang einer Geraden
- b) „Verformung“ – keine klar erkennbare Bruchlinie
- c) „Kombination“ – begrenzte Bruchlinie und größerer verformter Bereich in der Nähe der Druckstreifen

Die unterschiedlichen Brucharten sind in Abbildung A2-10 dargestellt.

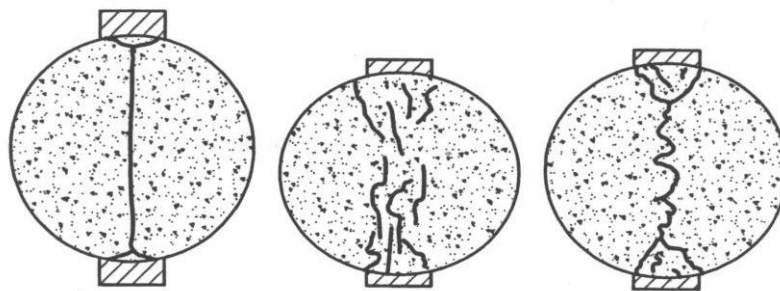


Abbildung A2-10: unterschiedliche Brucharten [27]

Nach Durchführung der Spaltzugprüfungen werden die indirekten Zugfestigkeiten der nassen Probekörper im Verhältnis zu denen der trockenen Probekörper bewertet. Der Quotient aus diesen Werten, der nach Norm mit ITSR (Indirect Tensile Strength Ratio) bezeichnet wird und in Prozent anzugeben ist, beschreibt die Wasserempfindlichkeit des geprüften Asphaltmischgutes. Im Idealfall, d. h. wenn die Spaltzugfestigkeit des nassen gleich der des trockenen Probekörpers ist, beträgt diese 100%. Je kleiner der ITSR-Wert ist, desto wasserempfindlicher ist das Mischgut.

Scherversuch

Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit einer Straßenbefestigung ist ein ausreichender Schichtenverbund von entscheidender Bedeutung. Er wird definiert als „kraftschlüssige Verbindung zwischen einzelnen Schichten bzw. Lagen einer Verkehrsflächenbefestigung durch Verzahnung und/oder Verklebung, wodurch Bewegungen zwischen den einzelnen Schichten bei Beanspruchung aus Klima und Verkehr verhindert werden sollen“ [29].

Die Verzahnung wird von der Mischgutzusammensetzung der Asphaltsschichten, der Einbautechnik, der Einbautemperatur des Mischgutes und der Temperatur der Unterlage

beeinflusst. Eine gute Verzahnung wird dadurch erreicht, dass die groben Gesteinskörner der oberen Schicht in den beim Einbau erwärmten Mörtel der Unterlage eindringen.

Die Verklebung wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Im Einzelnen wirkt sich hierbei die Verwendung von Asphaltmischgut mit einem klebefähigem Bindemittelfilm, das gleichmäßige Ansprühen einer sauberen Unterlage mit einem bitumenhaltigen Bindemittel und das Zusammenpressen der Unterlage mit dem Mischgut während des Einbaus und der Walzverdichtung günstig auf die Verklebung aus. Weiterhin muss gewährleistet sein, dass keine Fremdstoffe wie Schmutz, Wasser oder Reste von Trennmitteln das Verkleben verhindern. Eine ausreichend hohe Einbautemperatur wirkt sich positiv auf den Verklebungseffekt aus, da der Bindemittelfilm der Unterlage mit dem des neuen Mischgutes besser verschmelzen kann.

Die Untersuchung des Schichtenverbundes erfolgte im Rahmen dieser Forschungsarbeit gemäß ALP A-StB, „Arbeitsanleitungen zur Prüfung von Asphalt, Teil 4: Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner“ [30].

Hierfür wurden Plattenpakete aus 4,0 cm Asphaltdeckschicht auf einer 8,0 cm dicken Asphaltbinderschicht konventionell und ohne ein Ansprühen der Unterlage hergestellt, aus denen anschließend mit Hilfe einer stationären Bohrmaschine (vgl. Abb. A2-11) je zwei Bohrkerne mit einem Durchmesser von 150 mm entnommen wurden.



Abbildung A2-11: Bohrmaschine zur Entnahme der Bohrkerne

An den entnommenen Bohrkernen wurden mittels einem Schergerät nach Leutner (vgl. Abb. A2-12) die beiden Schichten gegeneinander abgeschert und der Verlauf von Scherkraft und Scherweg aufgezeichnet.

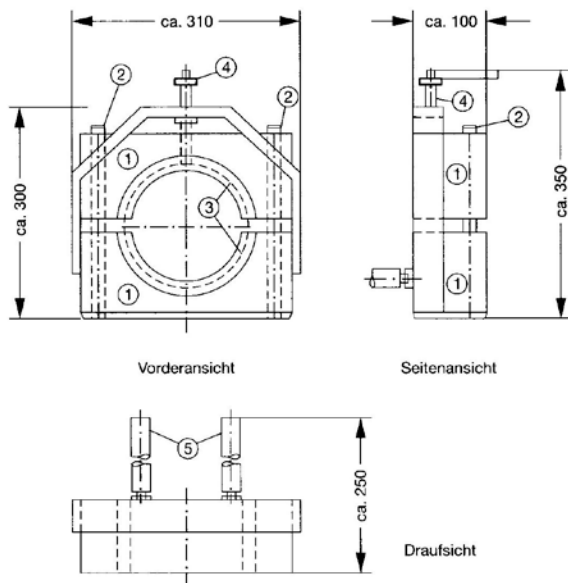


Abbildung A2-12: Schergerät nach Leutner [30]

Als Ergebnis der Prüfung ist einerseits die maximale Scherkraft und andererseits der bis zu deren Erreichen zurückgelegte Scherweg angegeben (vgl. Abb. A2-13).

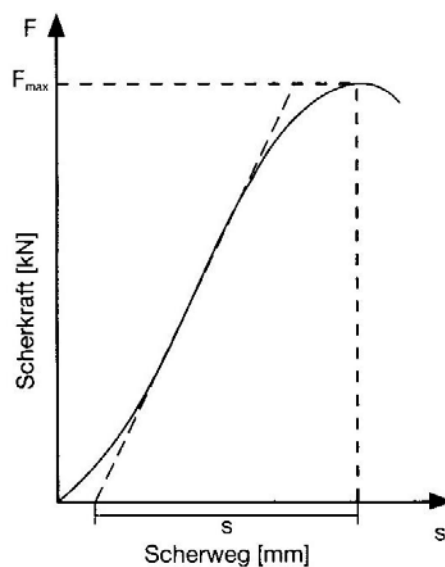


Abbildung A2-13: Prinzipskizze Scherkraftverlauf in Abhängigkeit vom Scherweg [30]

Prüfung des Tieftemperaturverhaltens

Die Prüfung des Tieftemperaturverhaltens und somit der Kälteeigenschaften erfolgte im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe von zwei unterschiedlichen Verfahren: dem einaxialen Zugversuch sowie dem Abkühlversuch.

Die Durchführung der Zugversuche erfolgte bei vier unterschiedlichen, während der Versuchsdurchführung jedoch konstant gehaltenen Temperaturen (+20°C, +5°C, -10°C, -25°C). Hierbei wurden die Probekörper nach einer ausreichenden Temperierung mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1mm/min auseinander gezogen. Als Ergebnis erhält man die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung des jeweiligen Probekörpers bei der gewählten Temperatur.

Der Abkühlversuch simuliert die Beanspruchung des Asphaltes durch jahreszeitlich auftretenden Temperaturveränderungen. Um dies zu erreichen, wird die Probekörperlänge konstant gehalten und die Prüftemperatur gleichmäßig abgesenkt (10 K/h). Als Ergebnis erhält man die aufgrund der Einspannung auftretenden abkühlungsbedingten Zugspannungen, die sogenannten kryogenen Spannungen. Überschreiten diese die Zugfestigkeit des Asphaltes, so tritt ein Bruch des Probekörpers auf. Die dazugehörige Bruchtemperatur wird ebenfalls als Ergebnis angegeben.

Die Differenz zwischen der ermittelten Zugfestigkeit und der kryogenen Zugspannung stellt die Zugfestigkeitsreserve eines Asphaltes dar. Diese ist ein Kennzeichen für die besondere Eigenschaft von Asphalt, neben abkühlungsbedingten Zugspannungen auch Zugspannungen aus Verkehrslasten aufnehmen zu können und ist an der Stelle des Zugfestigkeitsmaximums am ausgeprägtesten.

Ein Beispiel für die Ergebnisse der Tieftemperaturprüfungen ist in Abb. A2-15 dargestellt.

Für die Prüfung des Kälteverhaltens wurden Prismen mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm³ verwendet, die aus im Walzsektorverdichtungsgerät hergestellten Probeplatten nach dem in Abb. A2-14 dargestellten Schema herausgeschnitten wurden.

Anschließend wurden die Probekörper an den Stirnflächen auf die Halterungsvorrichtung geklebt und nach Aushärten des Klebers in die Prüfmaschine eingesetzt (vgl. Abb. A2-16 und A2-17).

Die Überprüfung der Kälteeigenschaften wurden an eine dafür geeignete externe Prüfstelle vergeben.

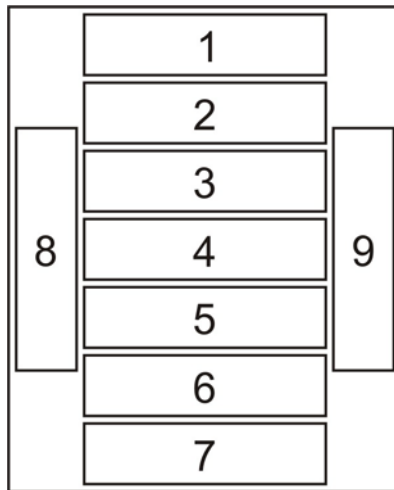


Abbildung A2-14: Schema für das Schneiden von Prismen

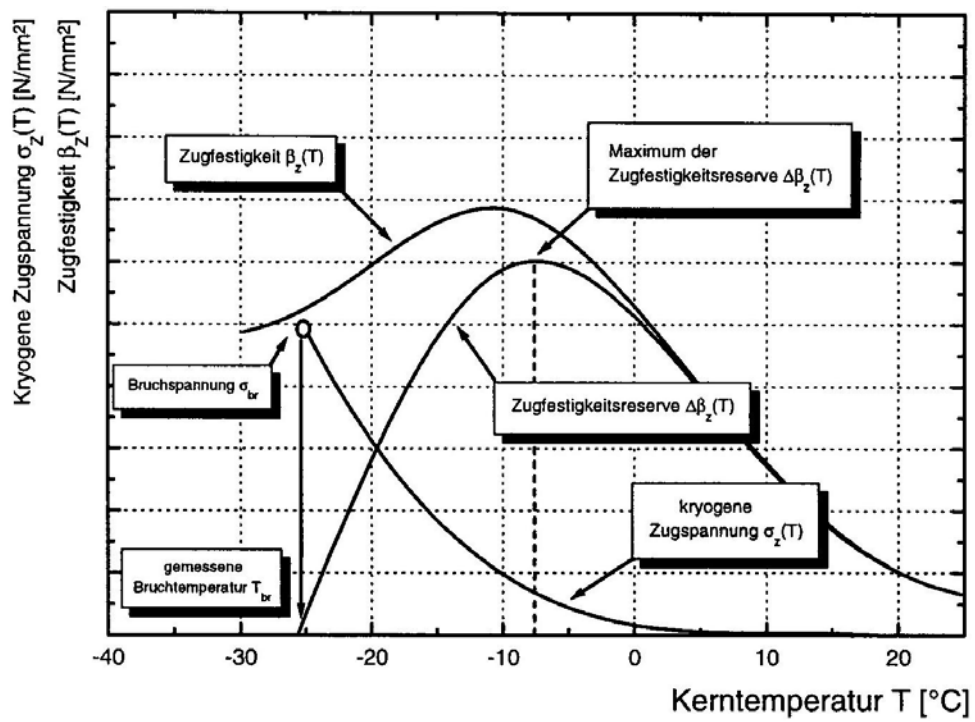


Abbildung A2-15: Prinzipskizze für eine Tieftemperaturprüfung

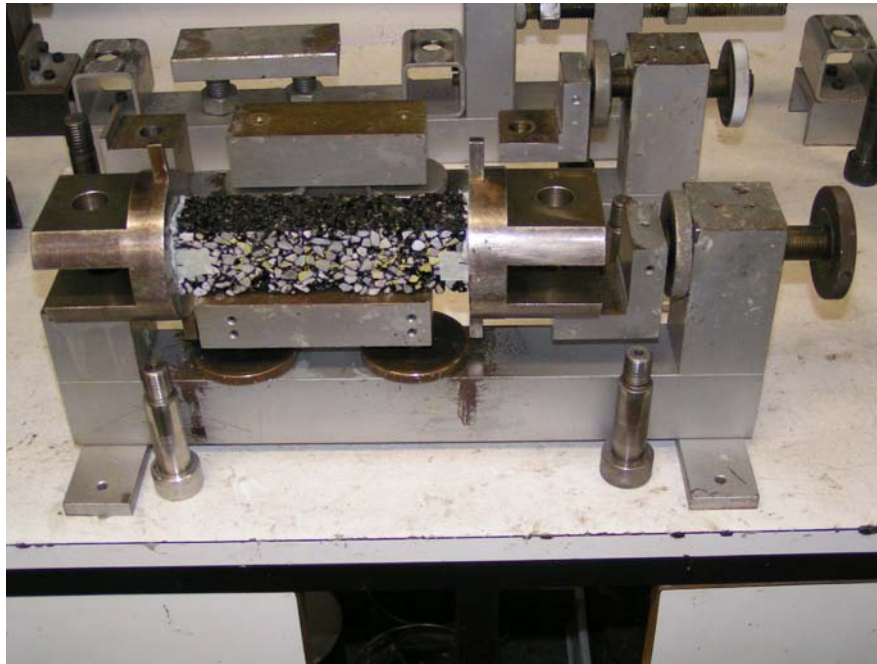


Abbildung A2-16: Geklebttes Prisma für Kälteversuche

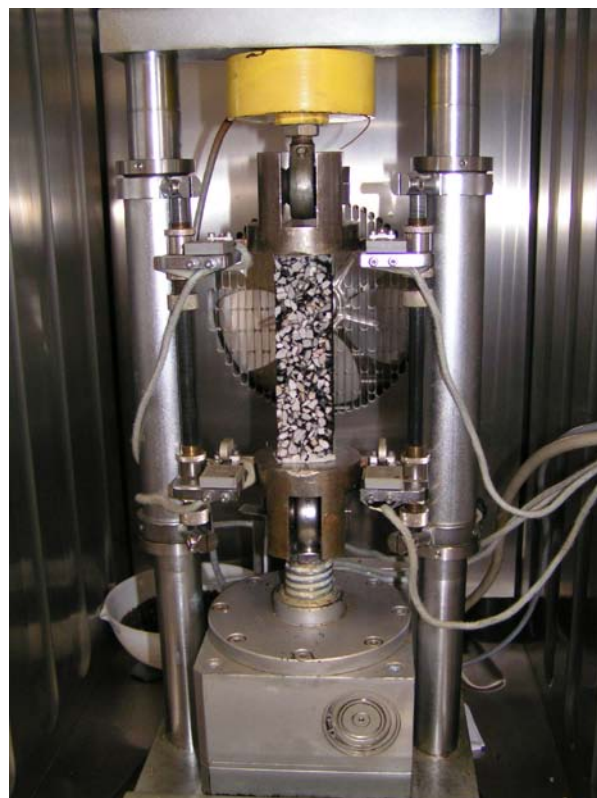


Abbildung A2-17: Prüfmaschine für Kälteversuche

3-Punkt-Biegeprüfung

Die Ermüdung eines Baustoffes ist definiert als „irreversibler Alterungsprozess unter Dauerbelastung, der zu bleibenden Formänderungen und zu einer Änderung der Mikrostruktur eines Baustoffes, Baustoffgemisches oder Bauteiles führt“ [29].

Die an Asphaltbefestigungen auftretenden Ermüdungsschäden sind nach der klassischen Beanspruchungstheorie die an der Unterseite der Asphalttragschicht initiierte und sich mit fortdauernder Beanspruchung nach oben fortsetzende Rissbildung. Die Ursache solcher Ermüdungsschäden ist folglich zuvorderst im Bereich der Tragschicht zu erwarten.

Da es sich jedoch bei dem im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Epoxy Asphalt um ein in Deutschland völlig neues Baustoffgemisch bzw. um ein neues Asphaltmischgut handelt, ist es von Interesse, auch hinsichtlich des Ermüdungswiderstandes eine grundsätzliche Aussage treffen zu können. Dies gilt insbesondere für die Bewertung der angestrebten hohen Dauerhaftigkeit des Materials.

Eine Asphaltbefestigung verliert durch die langjährige Belastung unter Verkehr allmählich einen Teil ihrer Ermüdungsbeständigkeit, die sich versuchstechnisch als ein Vorrat einer bestimmten Anzahl ertragbarer Lastwechsel ausdrücken lässt. Für die labortechnische Untersuchung dieser Eigenschaft stehen grundsätzlich unterschiedliche Prüfverfahren zur Verfügung. Die DIN EN 12697-24, „Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung“ [31] sieht insgesamt fünf verschiedene Verfahren vor:

- Zweipunkt-Biegeprüfung an trapezförmigen Probekörpern
- Zweipunkt-Biegeprüfung an prismatischen Probekörpern
- Dreipunkt-Biegeprüfung an prismatischen Probekörpern
- Vierpunkt-Biegeprüfung an prismatischen Probekörpern
- Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit von zylindrischen Probekörpern

Im Zuge der hier beschriebenen Untersuchungen erfolgte die Prüfung des Ermüdungswiderstandes mittels Dreipunkt-Biegeprüfung. Die in der DIN EN 12697-24 angegebenen Prüfbedingungen sind jedoch auf eine Prüfung von Probekörpern aus Asphalttragschichtmischgut abgestimmt (z. B. Probekörperabmessungen: 50 x 50 x 300 mm³). Aus diesem Grund wurde für die Untersuchung des zu prüfenden Deckschichtmaterials zwar das Prüfverfahren nach DIN EN 12697-24 gewählt, die Prüfbedingungen jedoch individuell festgelegt.

Dies waren im Einzelnen:

- Probekörperabmessung: $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ (vgl. Abb. A2-18)
- sinusförmige Belastungskurve
- Belastungsfrequenz: 5 Hz
- Oberlast: 0,3 kN
- Unterlast: 0,01 kN

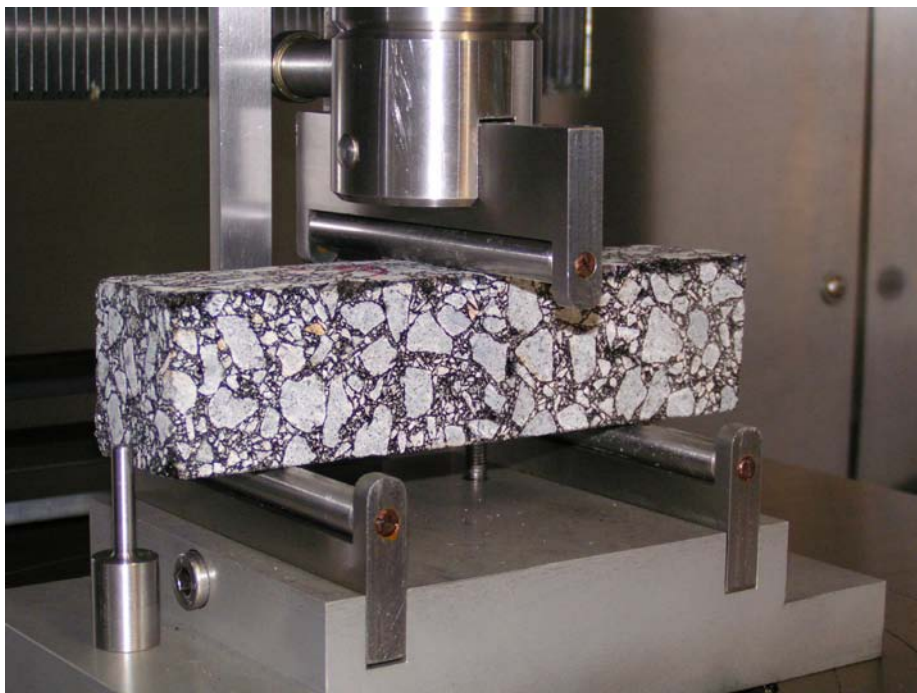
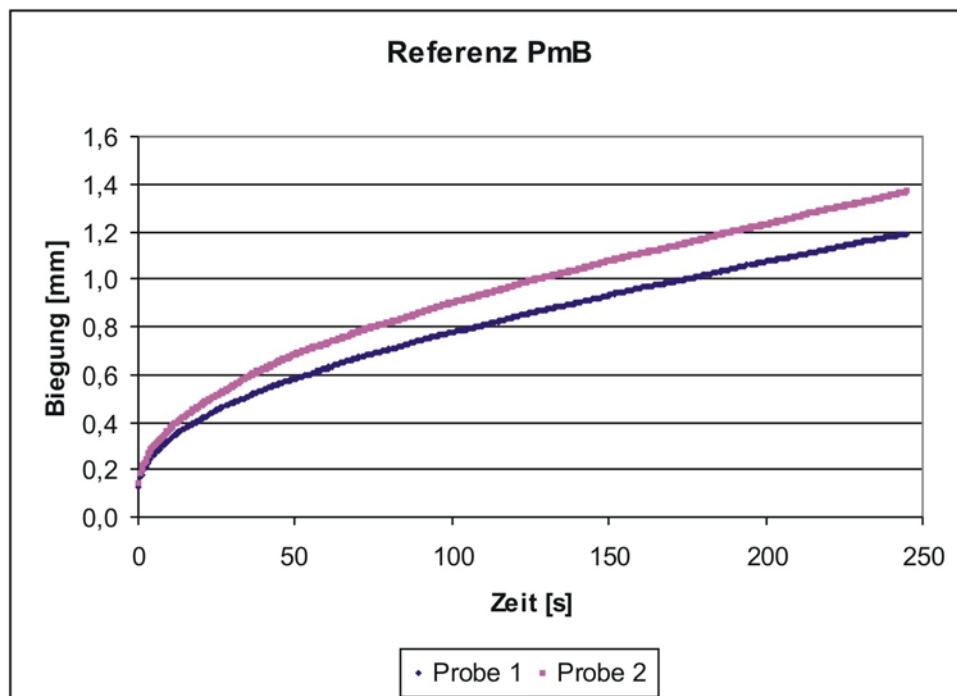
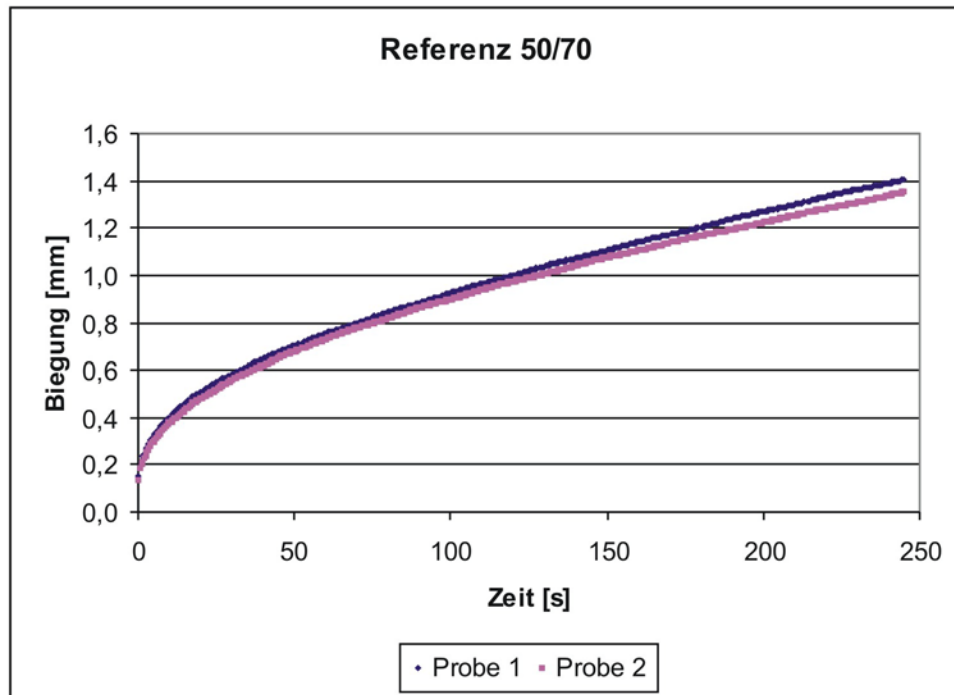


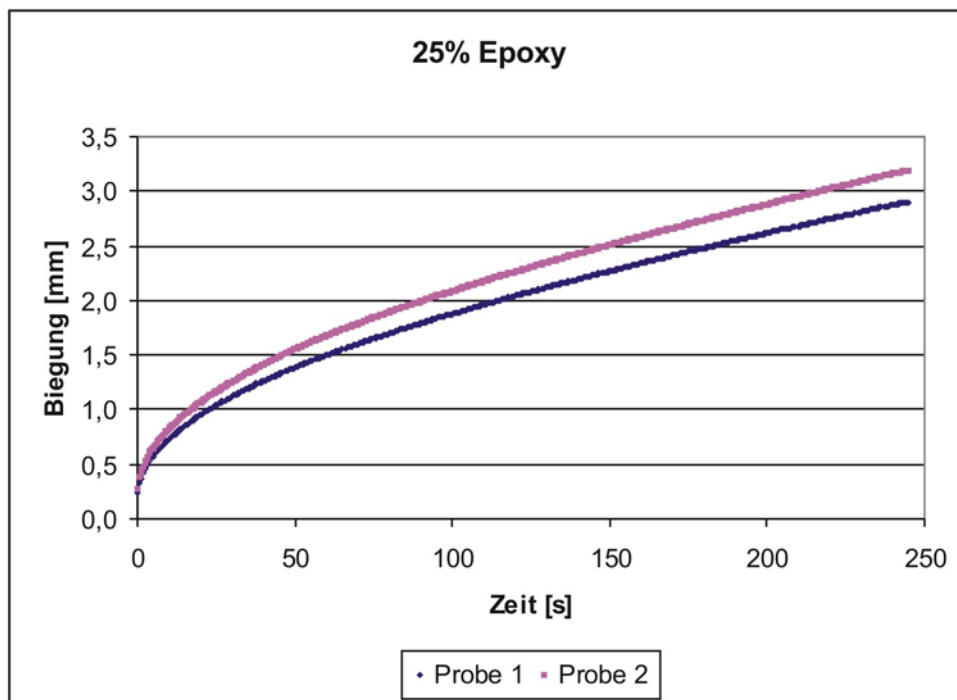
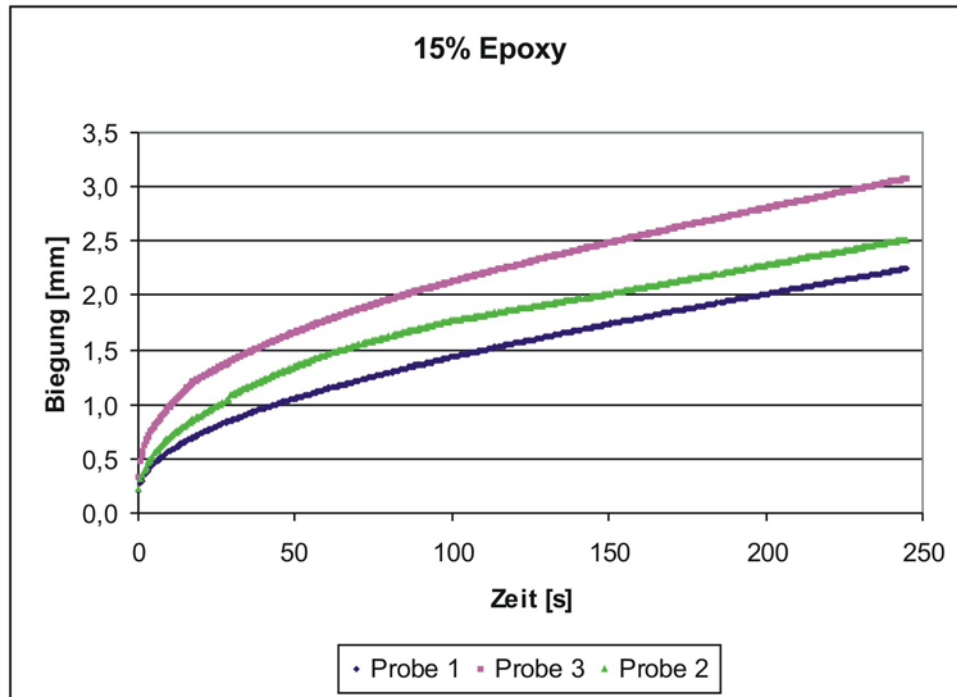
Abbildung A2-18: Dreipunkt-Biegeversuch an prismatischen Probekörpern

Als Prüftemperatur wurden nach mehreren Vorversuchen schließlich 15°C gewählt, da mit ihr eine praktikable Versuchsdauer und eine bessere Differenzierbarkeit der Ergebnisse erreicht werden kann.

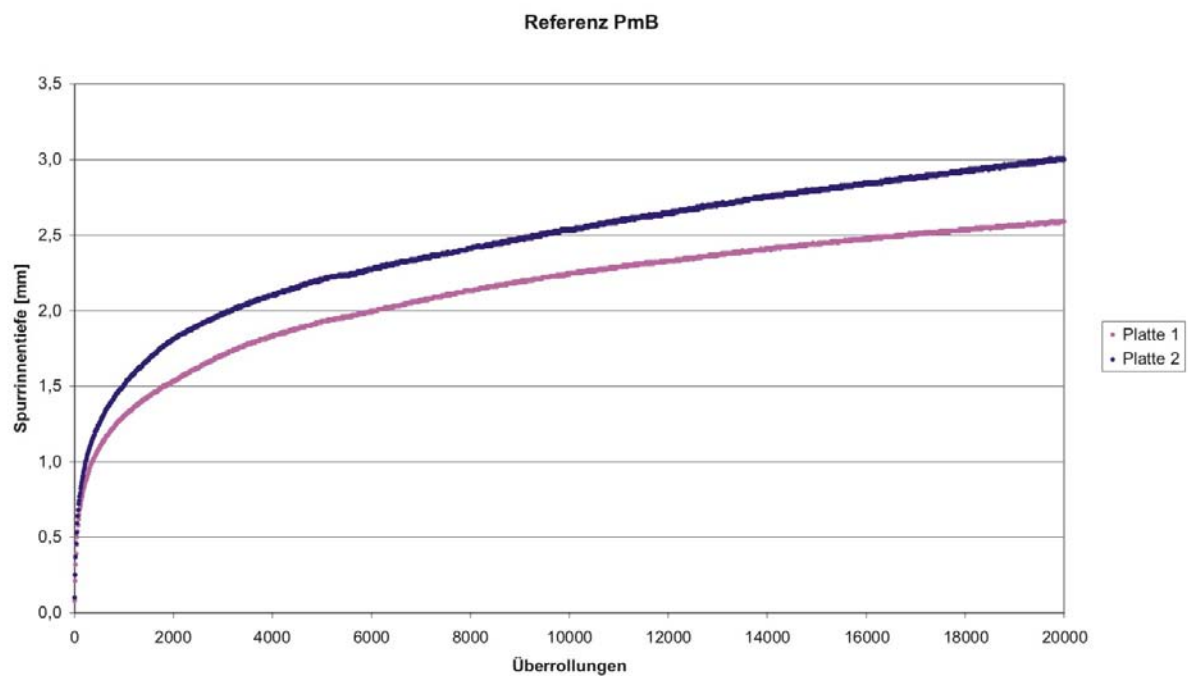
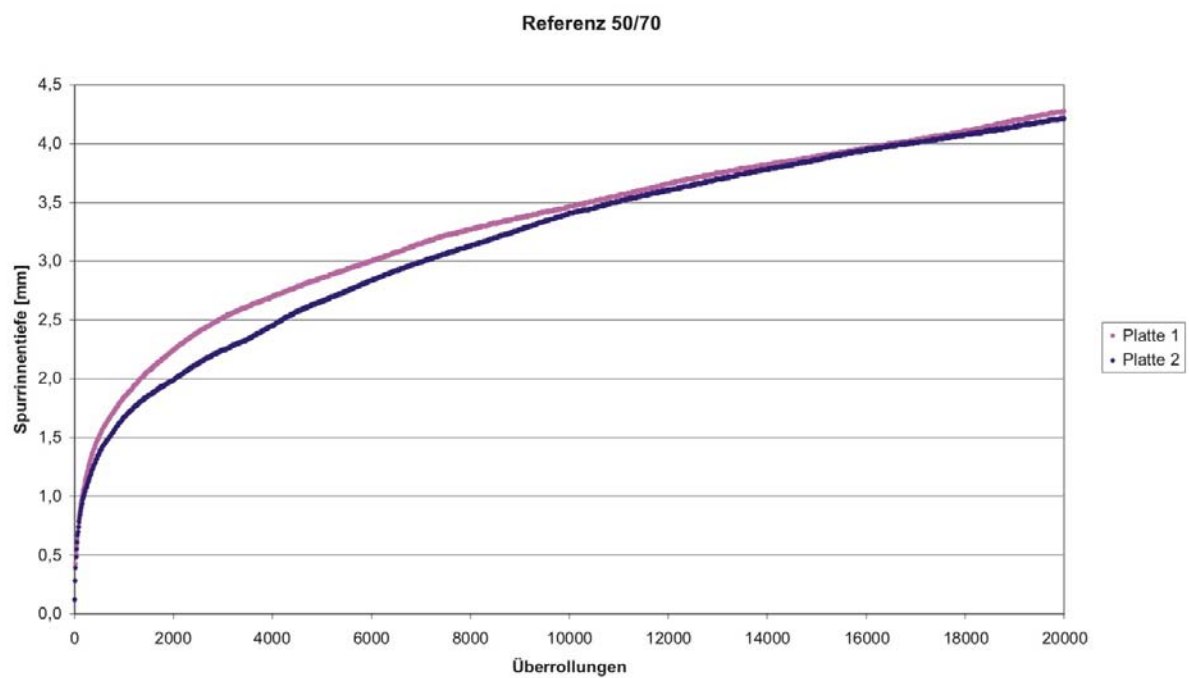
Das Ergebnis des Dreipunkt-Biegeversuchs ist eine Verformungskurve ähnlich der Impulskriechkurve beim Druckschwellversuch. Bewertungskriterium ist jedoch nicht die Lage eines Wendepunktes, sondern die Anzahl der Lastwechsel bis zum Bruch des Probekörpers.

Anhang 2: Ergebnisse der BBR-Prüfungen

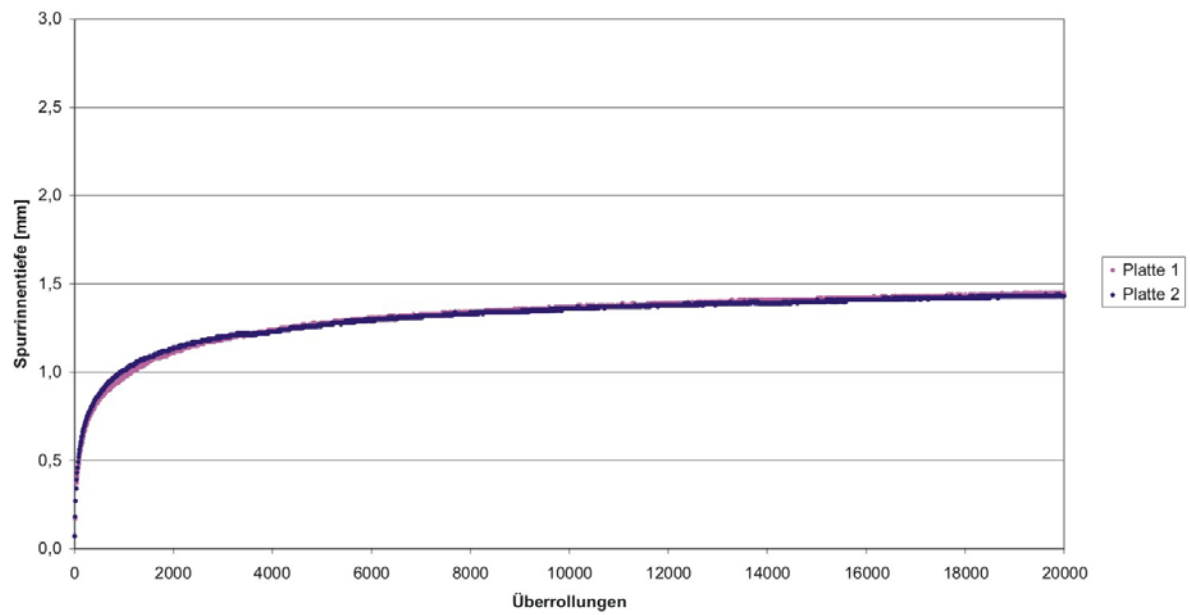




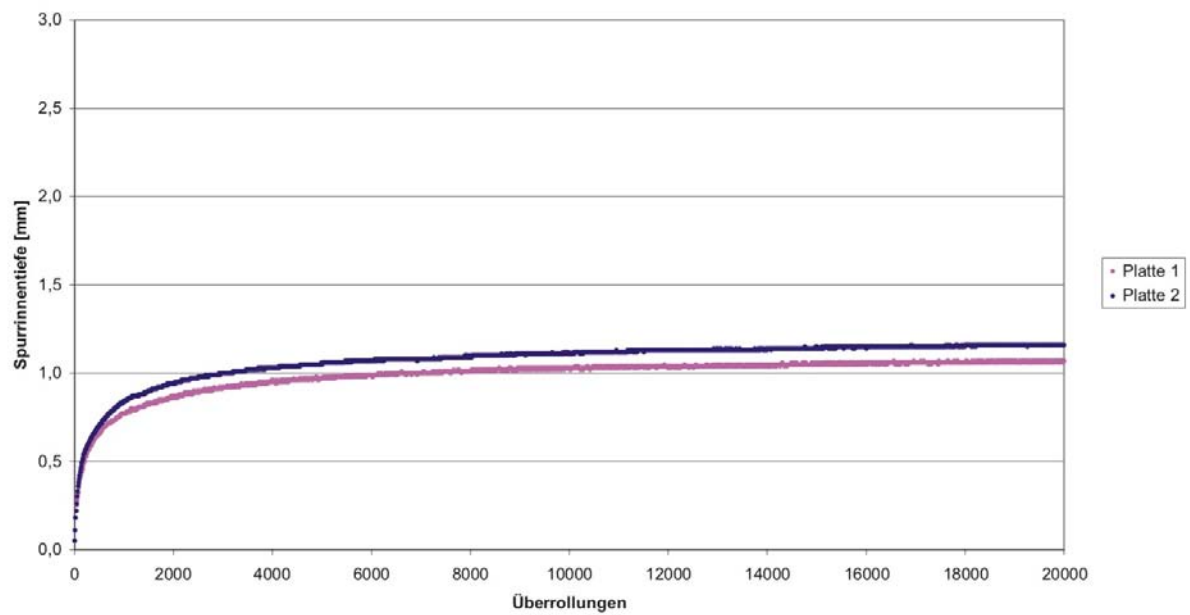
Anhang 3: Ergebnisse der Spurbildungsversuche



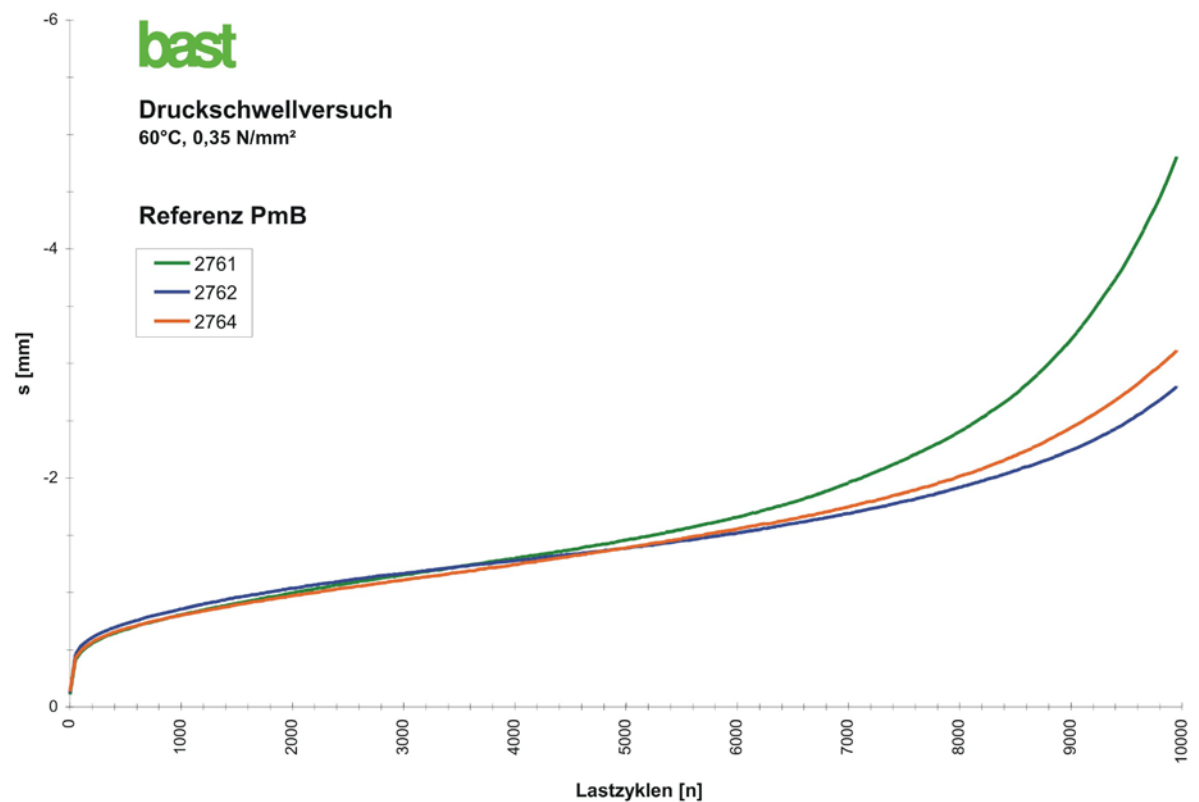
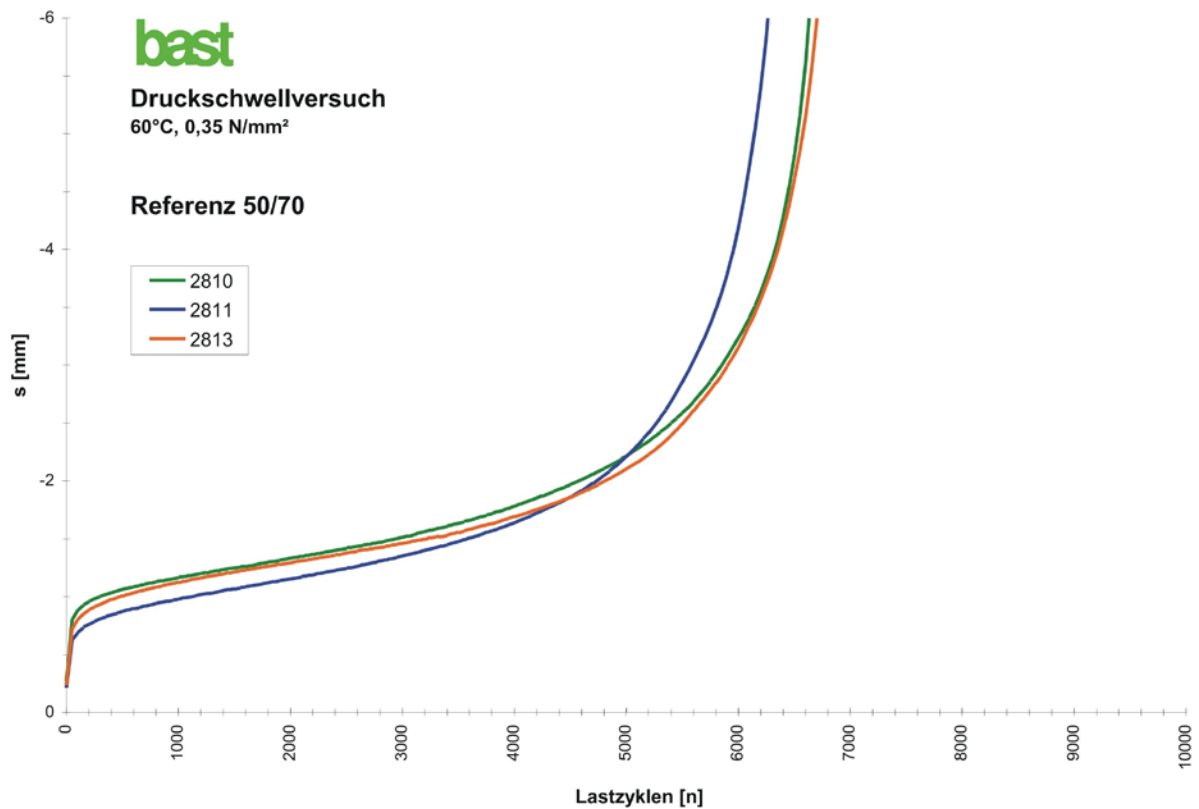
15% Epoxy

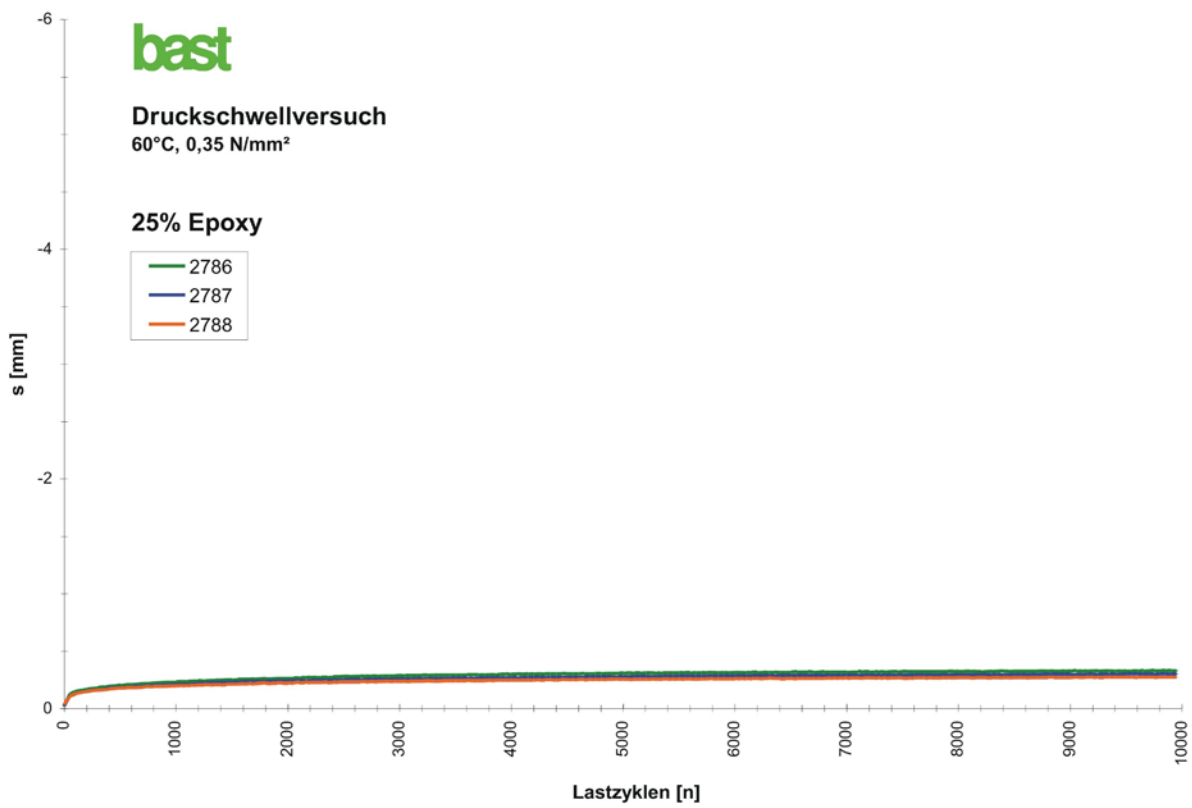
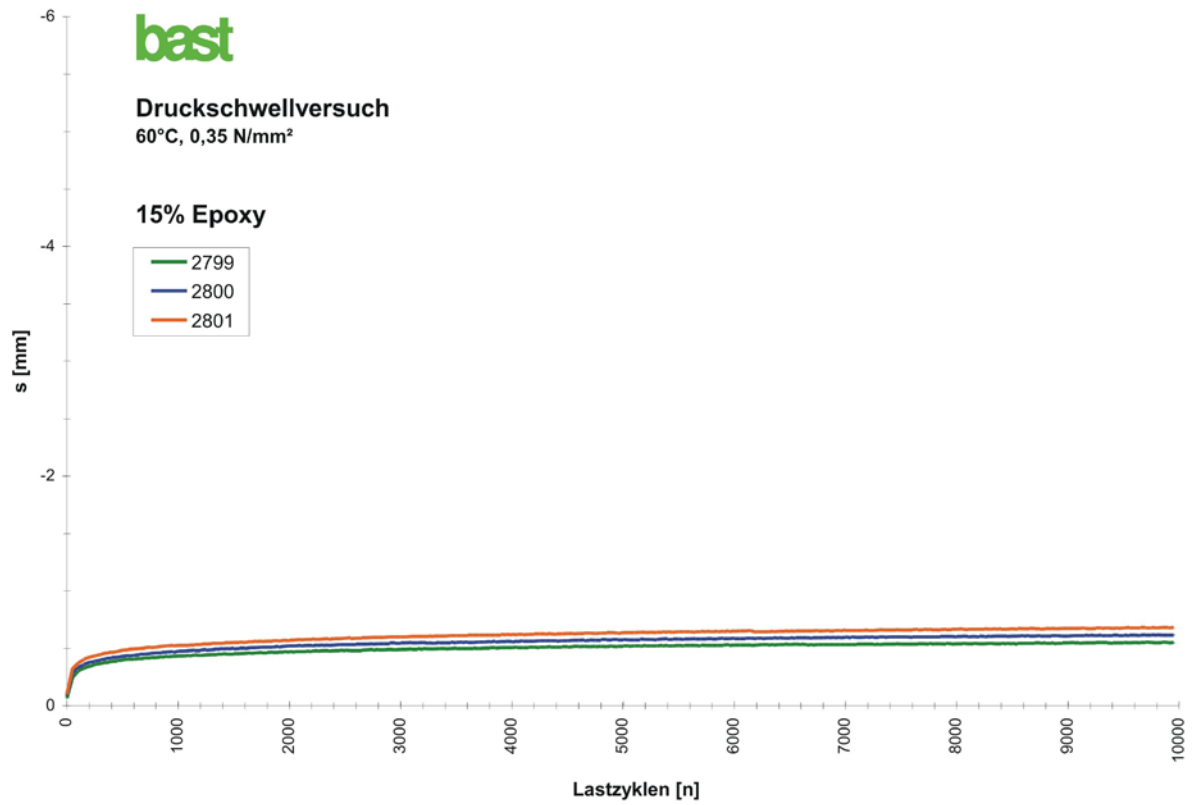


25% Epoxy



Anhang 4: Ergebnisse der Druckschwellversuche

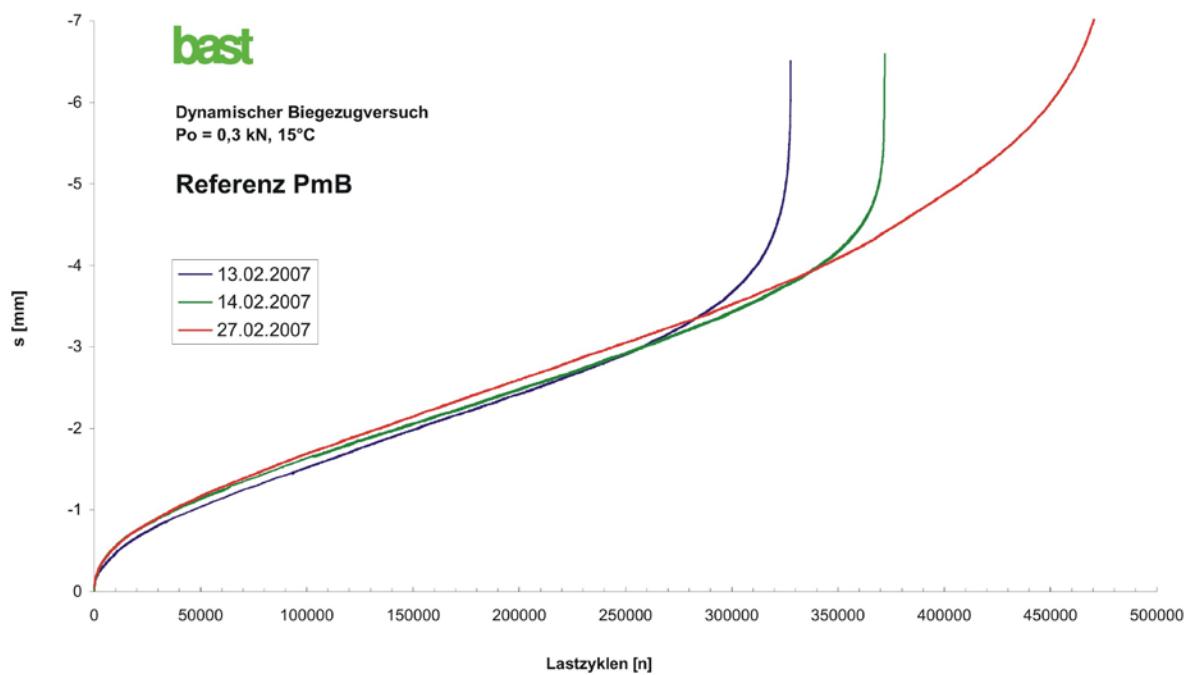
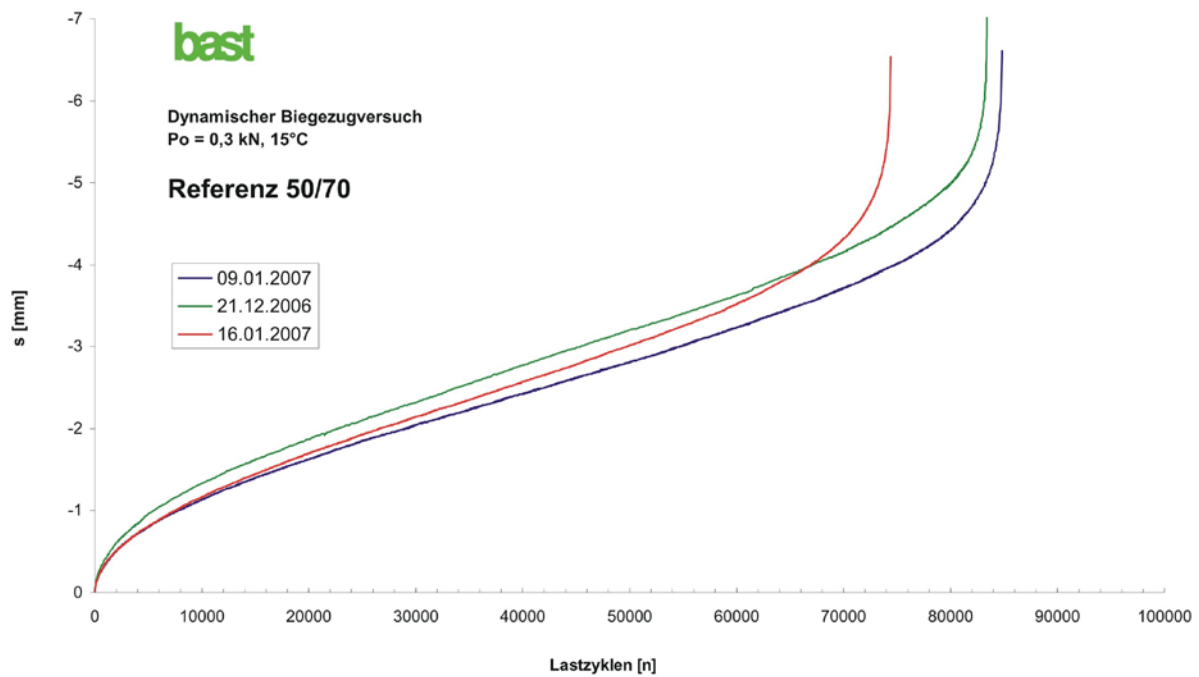


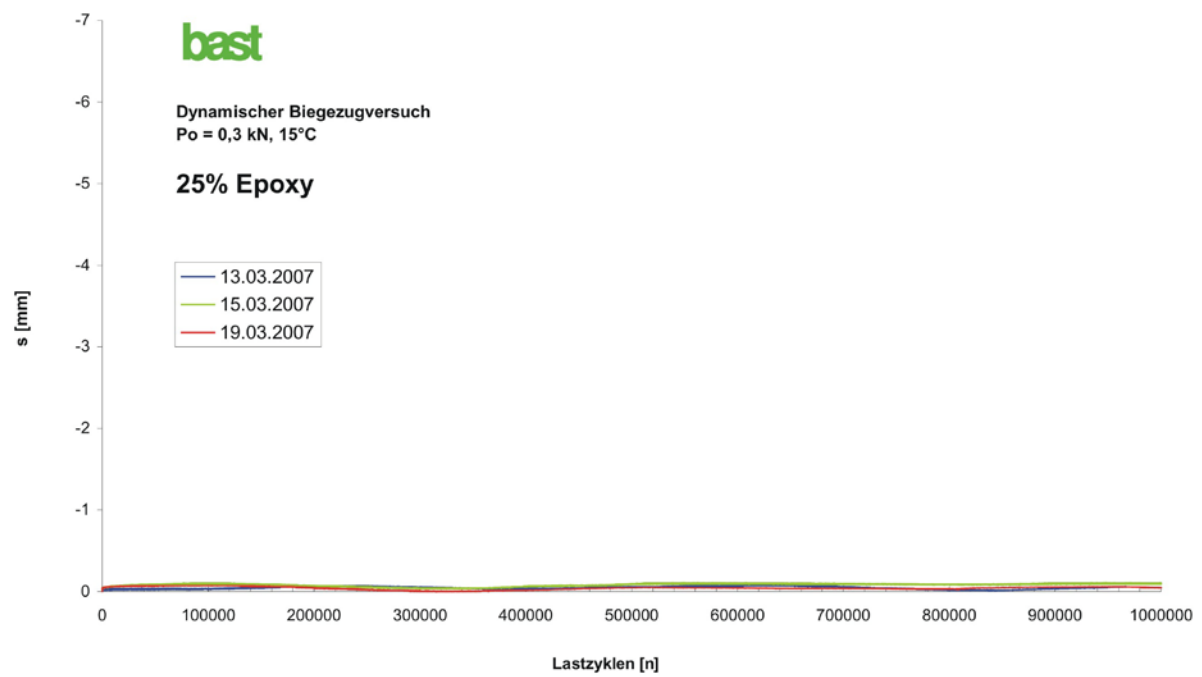
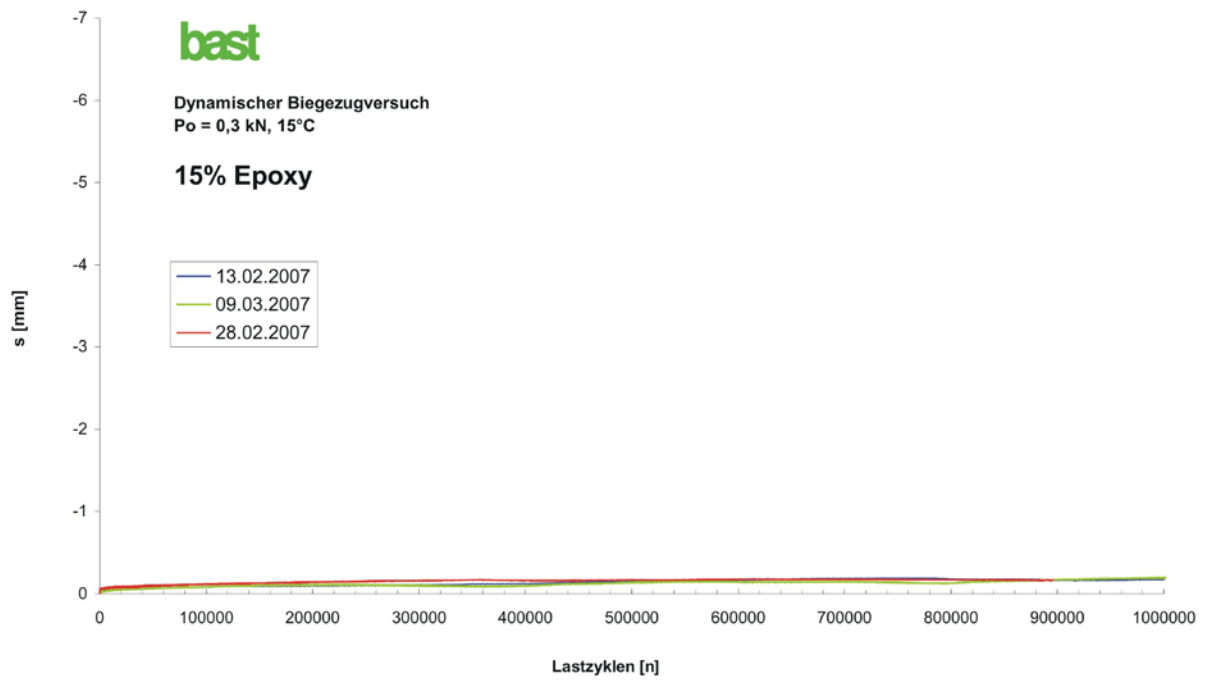


Anhang 5: Ergebnisse der Affinitätsprüfungen

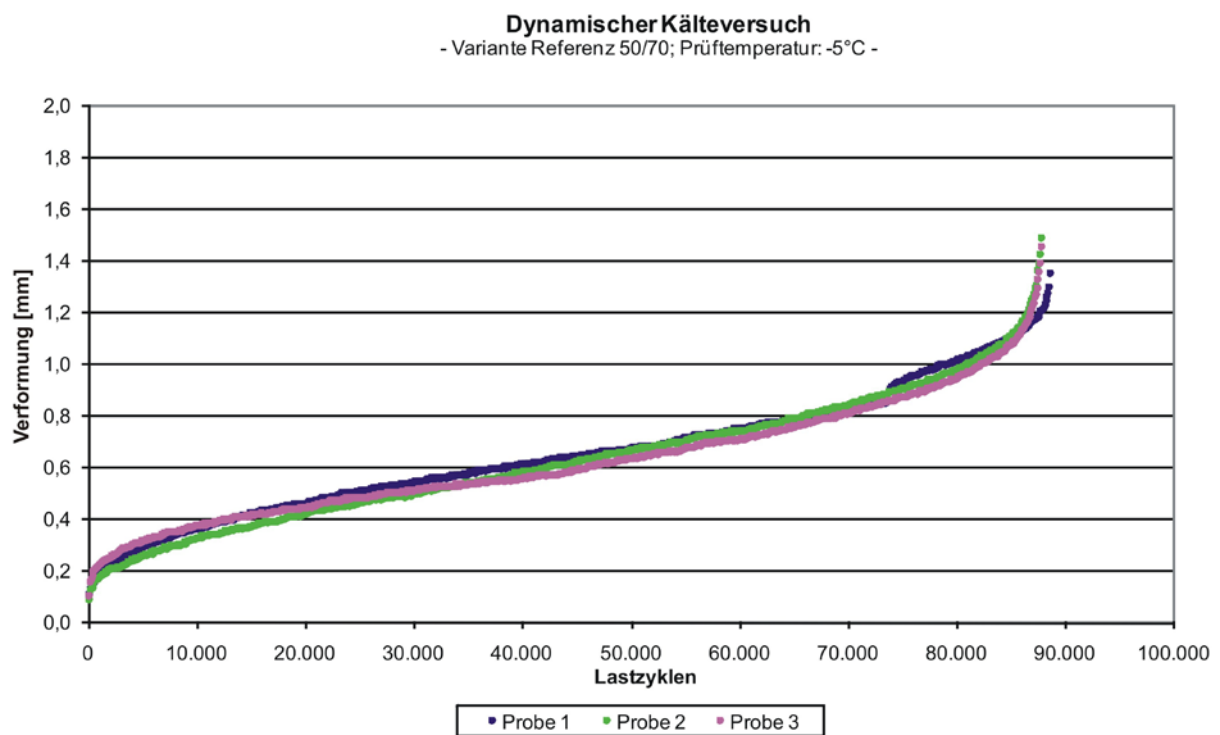
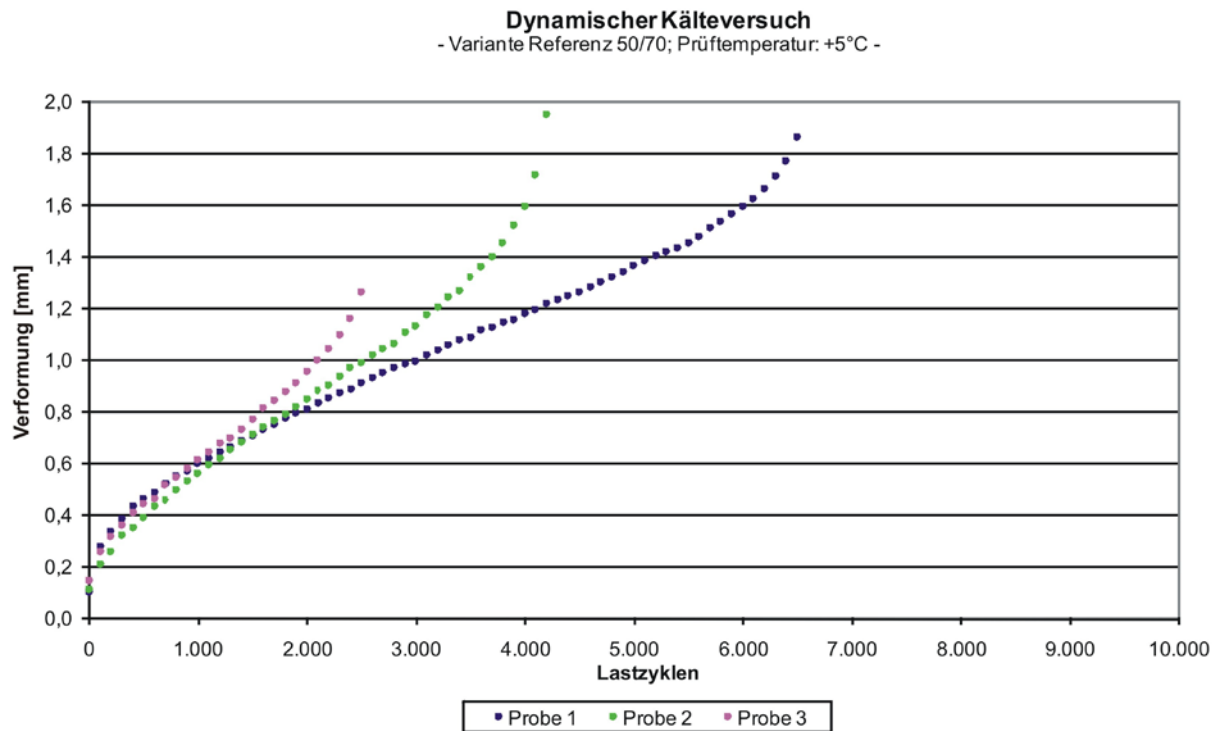
Variante	Referenz 50/70	Referenz PmB	15% Epoxy	25% Epoxy					
Kennzeichnung der Probe	50/70	PmB	15%	25%					
Datum	20.07.2006	09.02.2007	17.08.2006	22.08.2006					
Eigenschaften der Gesteinskörnungen									
Gesteinsart	Diabas	Diabas	Diabas	Diabas					
Steinbruch	Blasbach	Blasbach	Blasbach	Blasbach					
Körnung	8/11	8/11	8/11	8/11					
Korndichte [g/cm³]	2,831	2,831	2,831	2,831					
Eigenschaften des Bitumens									
Sorte	50/70	PmB 45 A	50/70	50/70					
Herkunft / Asphaltmischwerk	Total	Elf	Total	Total					
EP RuK [°C]	50,9	60,7	50,9	50,9					
Penetration [0,1 mm]	68	47	68	68					
BP nach Fraaß [°C]	-14,1	-19,4	-14,1	-14,1					
Bestimmung der Affinität von Gesteinskörnungen (EN 12697-11)									
Mischtemperatur [°C]	175	180	130	130					
Drehgeschwindigkeit [U/min]	60	60	60	60					
Rührzeit	6 h	24 h	6 h	6 h					
Umhüllung [%]	1. Prüfer	85	45	90	60	95	75	95	75
	2. Prüfer	85	45	85	70	95	75	95	70
	Mittelwert	85	45	90	65	95	75	95	75
Klumpenbildung	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Bemerkungen		Reines Bitumen		Reines Bitumen		Zugabe von 15% Epoxydharz		Zugabe von 25% Epoxydharz	

Anhang 6: Ergebnisse der Dreipunkt-Biegeversuche

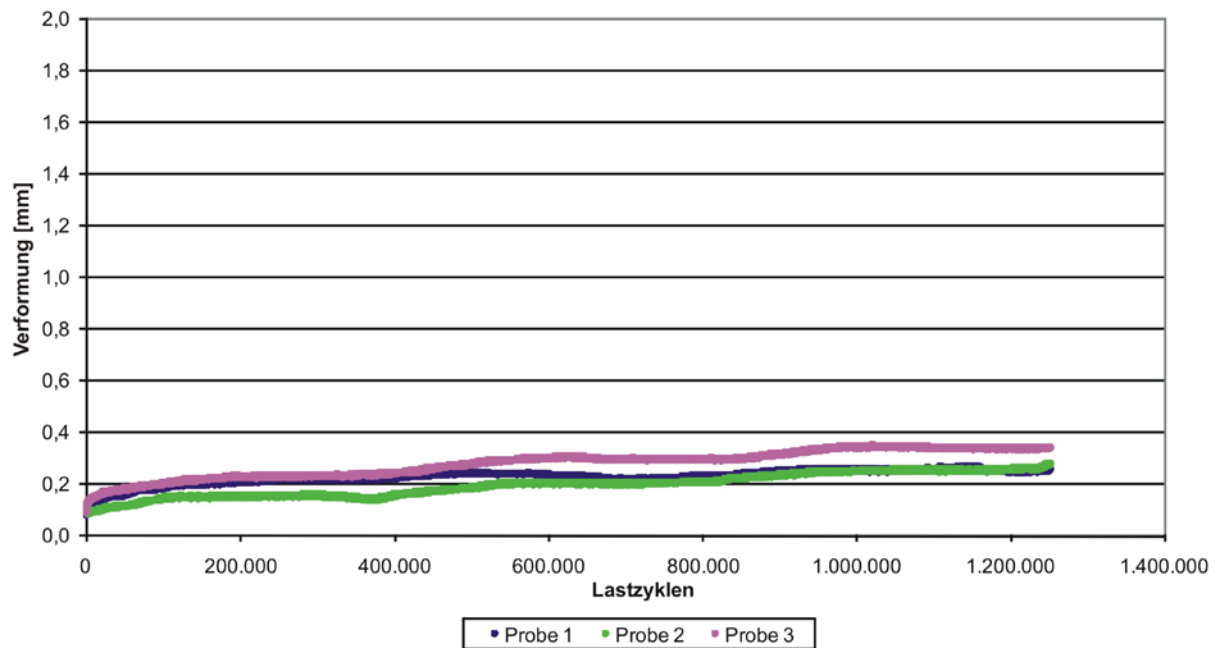




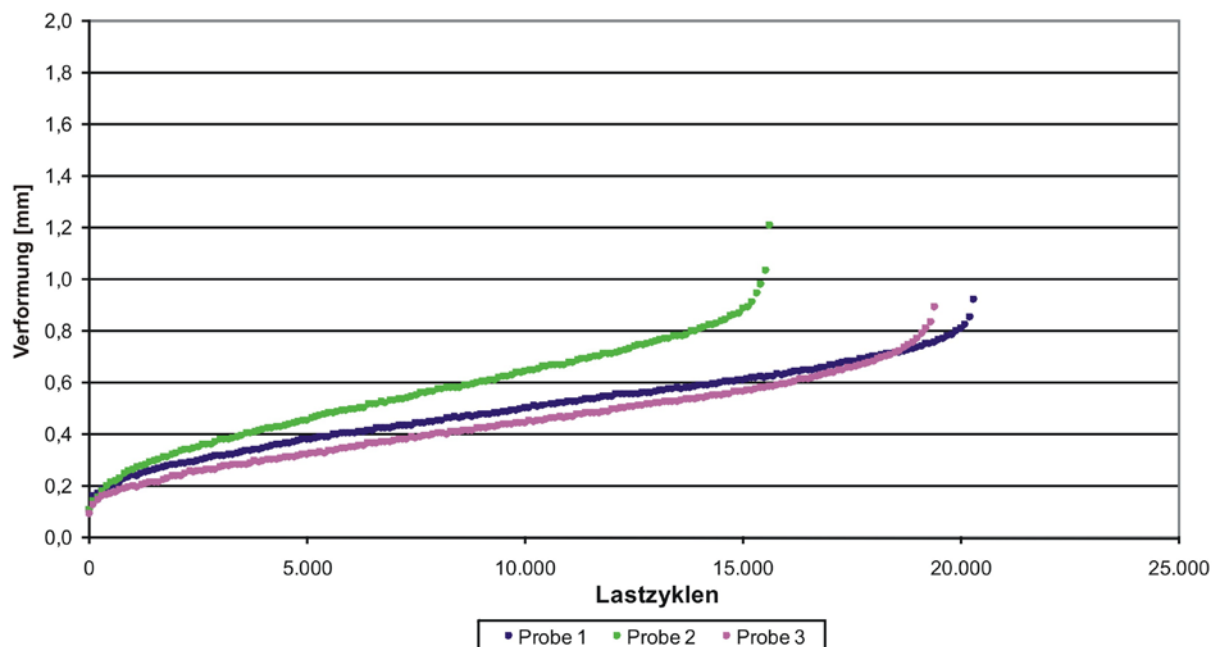
Anhang 7: Ergebnisse der Prüfung des Widerstandes gegen eine Dauerbelastung bei tiefen Temperaturen



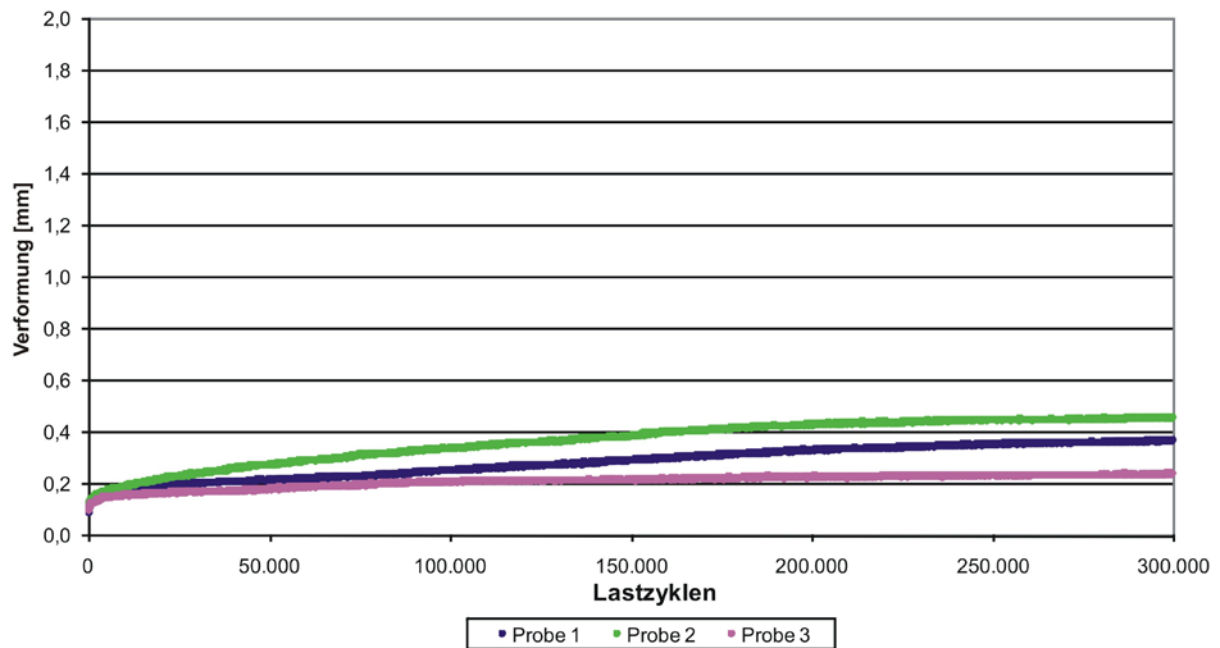
Dynamischer Kälteversuch
- Variante Referenz 50/70; Prüftemperatur: -15°C -



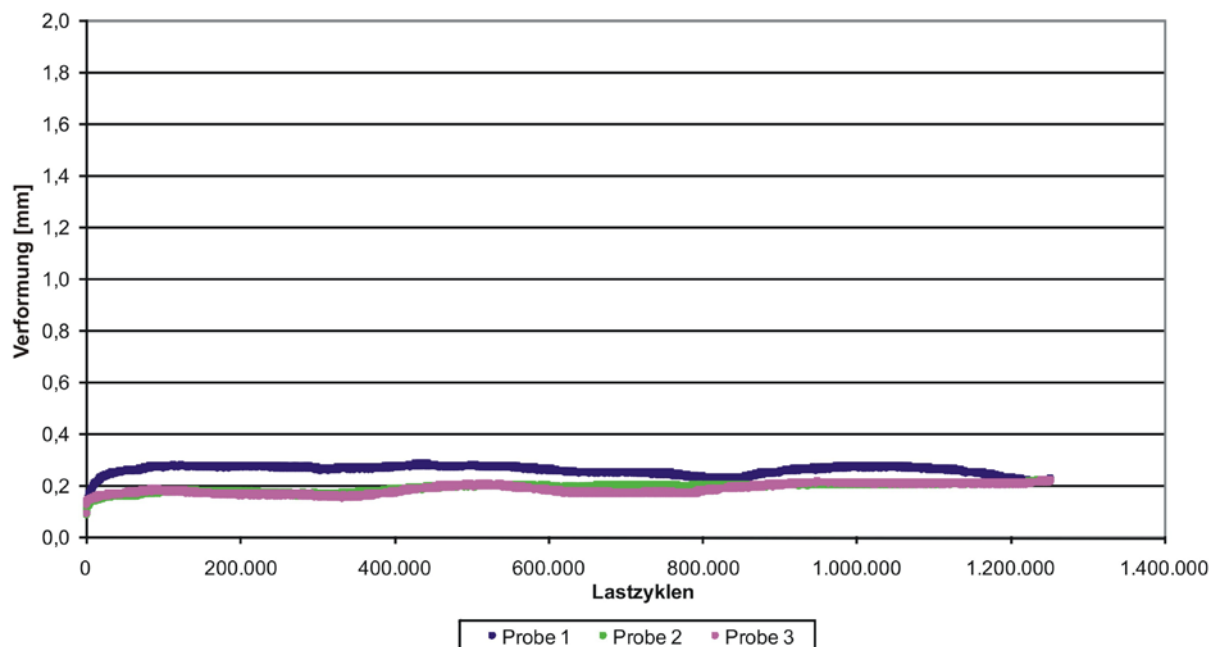
Dynamischer Kälteversuch
- Variante 15% Epoxy; Prüftemperatur: +5°C -



Dynamischer Kälteversuch
- Variante 15% Epoxy; Prüftemperatur: -5°C -



Dynamischer Kälteversuch
- Variante 15% Epoxy; Prüftemperatur: -15°C -



Bisher erschienen

SCHRIFTENREIHE DES
INSTITUTES FÜR STRASSENBAU UND VERKEHRSWESEN

- | | |
|--------|--|
| Heft 1 | Stefan Ludwig
Entwicklung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt unter Verwendung von Epoxydharz, 2009 |
|--------|--|

Ebenfalls erschienen

SCHRIFTENREIHE DES
FACHGEBIETES VERKEHRSWESEN UND VERKEHRSSBAU

- | | |
|--------|--|
| Band 1 | K.-G. Kuchenbecker, G. Hartkopf, R. Kühne
Festkolloquium zum 60. Geburtstag von Jörg Schönharting, 2001 |
| Band 2 | St. Bremer, D. Bruckmann, T. Janßen, J.A. Schmidt, J. Schönharting, E. Wolf
Metrorapid / Transrapid: Vernetzung, Umfeld und Verkehrsträger, 2005 |
| Band 3 | Sandra Terporten
Ein neues Verfahren zur Kombination von Mehrfahrgast-Taxi und ÖPNV – Das KOMET-System, 2004 |
| Band 4 | Urte Helling
Fahrtzeit- und Informationsvorteile durch Dynamische Zielführung – Der Einfluss der Verkehrsmeldungsqualität unter Beachtung von Netzauslastungen und Alternativrouten, 2006 |
| Band 5 | Dirk Bruckmann
Containerisierung des Einzelwagenverkehrs – Entwicklung einer Methode zur Abschätzung des containerisierbaren Aufkommens im Einzelwagenverkehr und Optimierung der Produktionsstruktur, 2006 |
| Band 6 | Stefan Tetzner
Ansatz zur Verbesserung der Positionsbestimmung als ein Beitrag zur Optimierung von Navigationssystemen für Radfahrer, 2008 |

Universität Duisburg-Essen
Institut für Straßenbau und Verkehrswesen
Institute of Road and Traffic Engineering
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Edeltraud Straube

ISBN 3-922602-33-9